中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 139 ~ 159
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com





评 述 中国综合地层和时间框架专辑

中国石炭纪综合地层和时间框架

王向东[1,2*], 胡科毅[2†], 郄文昆[1], 盛青怡[3], 陈波[4], 林巍[1], 要乐[3], 王秋来[1], 祁玉平[1], 陈吉涛[1], 廖卓庭[3], 宋俊俊[3]

1. 中国科学院资源地层学与古地理学重点实验室, 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;
2. 南京大学生物演化与环境科教融合中心, 南京 210023;
3. 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;
4. 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008
* 通讯作者, E-mail: xdwang@nigpas.ac.cn
† 通讯作者, E-mail: kyhu@nju.edu.cn

收稿日期: 2017-09-21; 收修改稿日期: 2018-07-02; 接受日期: 2018-07-20; 网络版发表日期: 2018-08-30
中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDB26000000, 18000000, XDPB05)、国家自然科学基金项目(批准号: 41290263)和科技部基础性专项项目(编号: 2013FY111000)资助

摘要 石炭纪共持续了60Myr, 在地质年代表上起始于358.9Ma, 结束于298.9Ma. 按国际标准石炭系包含2个亚系6个统7个阶, 其中3个阶的全球界线层型已经确立, 包括杜内阶、维宪阶和巴什基尔阶; 4个阶的全球界线层型尚没有确立, 分别是谢尔普霍夫阶、莫斯科阶、卡西莫夫阶和格舍尔阶. 本文基于华南的材料, 运用以生物地层学为基础的多重地层划分和对比方法, 建立了中国石炭纪年代地层框架. 通过高精度的生物地层学研究工作, 中国的石炭纪地层中可识别出牙形刺化石带37个, 有孔虫(包括䗴类)化石带24个, 菊石动物化石带13个, 腕足动物化石带10个, 四射珊瑚化石带10个. 通过这些化石带确立的生物地层格架, 建立中国区域性的石炭系年代地层框架(包括2个亚系4个统8个阶), 可以与全球其他地区的区域性年代地层框架进行精确对比. 同时, 中国在石炭纪化学地层、层序地层、旋回地层、事件地层等研究方向也取得了重要进展, 可以和全球进行良好对比. 中国石炭纪地层工作在未来的推进, 应加强海洋浅水相与深水相、海相与陆相地层的对比; 加强旋回地层的高分辨率天文年代标尺研究; 加强石炭纪古环境和古气候研究, 包括反映不同古环境指标的锶同位素、氧同位素的研究, 以及保存的植物化石气孔指数的研究等.

关键词 石炭系, 年代地层, 生物地层, 化学地层, 事件地层, 界线层型, 地层对比

1 引言

石炭纪(358.9~298.9Ma)持续了60个百万年, 是地质历史上的主要成煤时期. 石炭系至今仍是中、东欧地区煤炭能源的重要产能岩系, 美国历史上最早的油田以及目前在中部开采的页岩气也均产自石炭纪地层中. 早在20世纪早期, 国际性的石炭系合作会议和研究组织就已经形成. 1927年在荷兰东南部产煤城市海尔伦(Heerlen)召开第一届国际石炭系地质大会, 此后会议定期在全球各地举行, 迄今已召开了共18届, 极大

中文引用格式: 王向东, 胡科毅, 郄文昆, 盛青怡, 陈波, 林巍, 要乐, 王秋来, 祁玉平, 陈吉涛, 廖卓庭, 宋俊俊. 2019. 中国石炭纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 139–159, doi: 10.1360/N072017-00311
英文引用格式: Wang X D, Hu K Y, Qie W K, Sheng Q Y, Chen B, Lin W, Yao L, Wang Q L, Qi Y P, Chen J T, Liao Z T, Song J J. 2019. Carboniferous integrative stratigraphy and timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 135–153, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9253-7doi:

© 2018 《中国科学》杂志社

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

地促进了石炭纪地层区域对比、划分标准和规范等的制定.

石炭纪是全球构造运动十分强烈的时期. 著名的海西造山运动(Hercynian Orogeny)起始于石炭纪, 导致位于北方的劳亚大陆与南方的冈瓦纳大陆碰撞, 在北美形成了阿巴拉契亚山脉, 在西欧形成了莱茵-海西山脉. 可能是强烈的地壳运动造成风化作用加剧, 增强了有机碳的埋藏(Saltzman等, 2000), 或者是大量植物的繁盛, 导致了强烈的气候分异而形成冰室(Popp等, 1986; Berner, 1990, 1997; Mii等, 1999), 石炭纪因此成为显生宙最大的冰室气候时期(Chen等, 2018). 此段时间内冰期和间冰期频繁交替, 全球海平面升降更迭, 导致在各个大陆的边缘区形成了多层煤层沉积.

石炭纪是生物快速发展的时期. 海洋无脊椎动物以牙形刺、有孔虫、菊石、四射珊瑚、腕足类、苔藓虫、棘皮类、放射虫等为主, 其中的有孔虫和牙形刺分别是浅水相地层和深水相地层划分和对比的重要标志化石. 在密西西比亚纪, 全球海洋贯通, 海洋无脊椎动物的分区性不明显. 但到了宾夕法尼亚亚纪, 由于分隔北方劳亚大陆和南方冈瓦纳大陆的东西向瑞尼克洋(Montañez和Poulsen, 2013)的封闭, 生物分区性变得十分明显(Walliser, 1995). 石炭纪的两栖动物快速发展, 某些类型已经摆脱了对水的依赖, 演化成为早期的羊膜动物; 还出现了翼展达1m的蜻蜓. 石炭纪也是陆地植物高度繁盛的时期, 密西西比亚纪的植物面貌与晚泥盆世相似, 以古蕨类植物为主, 但到了宾夕法尼亚亚纪, 真蕨类和种子蕨类开始迅速发展, 裸子植物也已兴起; 随着陆地面积的扩大, 陆生植物从滨海地带向大陆内部延伸, 形成大规模的森林和沼泽, 给煤炭的形成提供了有利条件.

全球范围内石炭系具有明显的两分性. 下部主要以海相沉积为主, 在北美称为密西西比亚系, 在欧洲称为迪南统(Dinantian), 在中国称为丰宁亚系(统); 上部在北美和欧洲主要以海陆交互相沉积为主, 含丰富的煤层, 北美称为宾夕法尼亚亚系, 欧洲称为西里西亚统(Silisian), 在中国的南方仍以海相沉积为主, 称为壶天亚系(统). 根据此明显的两分特征, 国际地层委员会石炭纪地层分会于1998年、2000年进行了投票表决, 最终决定使用两个亚系来划分石炭系, 即下部的密西西比亚系及上部的宾夕法尼亚亚系, 从而产生了国际地质年表中唯一一个具有亚纪的地质时代. 尽管西欧和北美的石炭系研究历史较长, 研究程度高, 但两地均缺少宾夕法尼亚亚纪连续的海相地层, 为建立可供全球对比的年代地层框架带来了困难. 而俄罗斯地台、南乌拉尔、西班牙北部和华南地区, 发育有几乎完整的石炭纪碳酸盐岩沉积, 成为全球石炭纪年代地层研究的理想区域.

2 石炭纪年代地层研究简史

2.1 国际石炭纪年代地层框架的建立

石炭纪由Conybeare R D和Phillips W根据英格兰北部含煤地层于1822年命名(Ramsbottom, 1984). 此后, 在20世纪之前, 在西欧和东欧分别建立了很多石炭系的阶名, 如命名于比利时南部的纳缪尔阶(Namurian), 源于德国西部的威斯发阶(Westphalian)和法国中南部的斯蒂芬阶(Stephanian), 代表了西欧广泛分布的海陆交互相含煤地层; 命名于比利时南部的杜内阶(Tournaisian)和维宪阶(Visean)以及命名于俄罗斯莫斯科盆地的谢尔普霍夫阶(Serpukhovian)、莫斯科阶(Moscovian)和格舍尔阶(Gzhelian)则对应于海相碳酸盐岩地层.

早在19世纪末期, Munier和Lapparent(1893)就根据东欧的海相地层建立了石炭纪的年代地层框架, 从老至新为迪南阶(Dinantian)、莫斯科阶和乌拉尔阶(Uralian), 其中的后两个阶相当于西欧地区陆相含煤地层的威斯发阶和斯蒂芬阶. 但事实上, 这一划分方案并没有被广泛使用, 其中的莫斯科阶和乌拉尔阶与目前的含义有很大的不同. 在1927年召开的第一届国际石炭系地质大会上, 建议石炭系的划分采用以西欧地区年代地层框架为代表的四阶方案, 即下石炭统的迪南阶与上石炭统的纳缪尔阶、威斯发阶、斯蒂芬阶(Wagner和 Winkler Prins, 2016).

在1971年德国克雷费尔德(Krefeld)召开的第七届石炭系地质大会上, 石炭纪的年代地层划分仍然沿用西欧的传统并运用西欧的年代地层单位名称, 将石炭系划分为迪南亚系和西里西亚亚系, 分别代表原来的下和上石炭统, 前者包含杜内阶和维宪阶, 后者含纳缪尔阶、威斯发阶和斯蒂芬阶. 但随着全球对比的需要, 海相地层研究的更进一步深入, 东欧及北美的海相石炭系的研究越来越得到国际上的认可. 1975年在莫斯科召开的第八届石炭系地质大会上, 大会主席

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

Bouroz A首次提出了目前被广泛接受的划分方案, 将石炭系分为密西西比亚系和宾夕法尼亚亚系, 前者从老至新包括杜内阶、维宪阶和谢尔普霍夫阶, 后者包括巴什基尔阶(Bashkirian)、莫斯科阶、卡西莫夫阶(Kasimovian)和格舍尔阶. 这个综合了西欧、俄罗斯盆地、北美海相地层的划分方案得到了世界上较为广泛的认可, 改变了以前一直沿用西欧石炭系划分标准的状态.

国际地层委员会石炭系地层分会在1998年进行了投票表决, 确定使用密西西比和宾夕法尼亚两个亚系的划分方案. 1999年在加拿大卡尔加里(Calgary)举行的第14届石炭系地质大会就石炭系的亚系、统、阶进行了广泛讨论, 时任石炭系地层分会主席的Heckel P正式就1975年的综合性方案提出建议, 列其为石炭纪年代地层划分的方案(Heckel, 2001), 得到了国际石炭系地层分会的正式认可. 尽管已经建立了国际年代地层框架, 但各国仍在使用地方性的年代地层单位, 西欧、俄罗斯莫斯科盆地和乌拉尔、北美内陆地区等地阶一级的年代地层划分十分详细但对比关系不明.

在已经确立的石炭系国际年代地层框架中, 杜内阶和维宪阶都是基于比利时的海相地层命名的(参见Hance等, 2006a, 2006b); 谢尔普霍夫阶、莫斯科阶和格舍尔阶是Nikitin(1890)根据莫斯科盆地南部的地层提出的; 巴什基尔阶由Semikhatova(1934)在俄罗斯南乌拉尔的巴什基尔山脉地区建立; 卡西莫夫阶是Nikitin(1890)建立的莫斯科阶的一部分, 由Teodorovich (1949)更名为卡西莫夫阶.

石炭系底界的国际标准确立较早, 法国的La Serre剖面于1990年获国际地科联批准, 成为全球石炭系底界暨杜内阶底界的界线层型, 而德国的Hasselbachtal剖面和中国桂林的南边村剖面被分别作为辅助层型. 石炭系的中间界线, 即巴什基尔阶底界的界线层型于1996年获得国际地科联批准, 位于美国内华达州Arrow Canyon剖面. 密西西比亚系维宪阶的底界层型于2008年获得了国际地科联的批准, 位于我国广西柳州碰冲剖面(Devuyst等, 2003; 侯鸿飞等, 2013). 剩余的4个阶, 包括谢尔普霍夫阶、莫斯科阶、卡西莫夫阶和格舍尔阶尚没有确立界线层型.

2.2　中国石炭纪年代地层划分沿革

中国石炭纪地层单位的建立与应用, 是由我国第一代地质学家丁文江等的卓绝工作开创的. 1914年, 丁文江将滇东、黔西地区的石炭纪地层称为威宁系, 但这一名称的正式定义发表在20多年之后(Ting和Grabau, 1936). 继丁文江等在中国南方的地层调查, 翁文灏、李四光、赵亚曾则通过调查华北、东北的石炭纪含煤地层, 于1925、1926年建立了与威宁系时代大体相当的太原统、本溪统, 并将我国北方的晚石炭世地层自下而上分为本溪统、太原统和山西统. 嗣后, 丁文江通过调查桂北、黔南地区的石炭系, 于1931年建立丰宁系, 划分丰宁系为岩关群和大塘群, 自下而上再分为革老河统、汤粑沟统、旧司统和上司统. 与地层调查同步开展的古生物研究也取得了重大进展, 李四光(1927)、赵亚曾(1927, 1928, 1929)、尹赞勋(1932, 1933)、陈旭(1934a, 1934b)、葛利普(Grabau, 1936)等古生物学家, 相继发表了䗴类、腕足动物、软体动物等石炭纪常见化石的一系列著作, 为丁文江、葛利普在1933年第16届国际地质大会上提出中国石炭系划分方案, 提供了扎实的古生物依据. 由他们提出的划分方案正式刊出于第16届国际地质大会会议论文集(Ting和Grabau, 1936), 将中国石炭系二分, 其下、上亚系名称引用北美密西西比亚系和宾西法尼亚亚系, 各自再分为下、中、上三部分, 并将岩关群和大塘群与欧洲的杜内阶与维宪阶对比. 这个方案为后续研究中国石炭系, 特别是统、阶一级年代地层单位的建立奠定了良好基础.

在20世纪50~70年代, 中国的石炭系划分采用与前苏联相似的三分方案, 将原来的上石炭统一分为二, 改称中统和上统, 原下石炭统以及所有相当阶一级年代地层单位的名称几乎原封未动. 杨敬之等(1962)系统总结了石炭纪的岩石地层、生物地层及年代地层研究进展, 将石炭系三分, 下石炭统进一步划分为岩关阶和大塘阶, 中石炭统和上石炭统没有进一步划分. 80年代以来, 中国石炭纪年代地层划分的研究进展主要体现在: 首先, 在几乎没有反对意见的情况下, 中国石炭系恢复了上、下统二分的方案(杨敬之等, 1979; 侯鸿飞等, 1982), 这与我国石炭纪地层序列及生物群演化的事实相符; 其次, 中国学者积极参与石炭系全球界线层型剖面与点位(GSSP)的竞争, 在广西桂林南边村确立了泥盆系-石炭系界线的副层型(Yu, 1988); 与国外科学家合作, 于2008年在中国广西确立了维宪阶底界的界线层型. 1987年和2007年在中国的北京和南京分别

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

召开了第11届和第16届国际石炭系(和二叠系)地质大会.

中国区域性的年代地层划分在20世纪80~90年代也被大量地建立起来, 主要根据华南的贵州、广西、湖南等地的地层序列, 且绝大多数阶名均直接采用了岩石地层单位名称(芮琳等, 1987; Zhang, 1987, 1988; 张正华等, 1988). 其中, 罗苏阶是基于产丰富牙形刺化石的斜坡相地层建立的(芮琳等, 1987), 其余的区域性的阶都是根据浅水相地层建立的(王向东和金玉玕, 2000). 本世纪以来, 没有新的年代地层的阶名的提出, 我国石炭纪年代地层学的研究重点集中在深水斜坡相的生物地层学, 着力于全球地层高精度对比以及4个未定的全球界线层型标志化石的寻找和对比.

中国区域性的石炭纪年代地层的划分包括两个亚系, 即下部的丰宁亚系和上部的壶天亚系, 分别相当于国际标准的密西西比亚系和宾夕法尼亚亚系; 两个亚系又各划分为两个统, 分别为岩关统和大塘统、威宁统和马平统, 包括下列8个阶: 汤粑沟阶、旧司阶、上司阶、德坞阶、罗苏阶、滑石板阶、达拉阶和小独山阶(图1)(金玉玕等, 2000; Wang和Jin, 2003; 王向东和金玉玕, 2005).

3 中国石炭纪综合地层框架

建立石炭纪年代地层框架的基础是生物地层学, 这是国际地层委员会颁布的《国际地层指南》的要求, 年代地层基本单位阶的界线层型是以生物演化谱系中后裔种的首现来定义的. 近年来, 化学地层、磁性地层、事件地层、同位素绝对年龄等作为全球地层对比的辅助工具, 在建立全球年代地层框架的过程中也受到了越来越多的重视. 四个未确立全球界线层型的石炭系阶中, 格舍尔阶的底界标志化石已经确定为牙形刺*Idiognathodus simulator*, 其余3个阶即谢尔普霍夫阶、莫斯科阶和卡西莫夫阶的底界标志化石尚没有确定, 但基本确定运用牙形刺作为这些阶的底界层型的首选化石门类(Richards, 2013). 我国华南、俄罗斯乌拉尔、西班牙北部三个地区发育有连续的斜坡相石炭纪海相地层, 是确定石炭纪各个阶底界界线层型剖面的理想地区. 其中尤以华南地区的剖面更为连续和完整, 沉积速率快, 保存有连续演变序列的牙形刺化石.

3.1 生物地层格架

牙形刺是石炭纪年代地层划分的首要门类, 其次是有孔虫, 被作为对比斜坡相和浅水相地层的桥梁. 菊石作为斜坡相的重要化石, 在欧洲石炭系的早期研究中, 常常被用作标准化石来划分和对比石炭系. 腕足类和四射珊瑚在浅水台地相的石炭系划分和对比中, 也起到了重要的作用.

3.1.1 牙形刺

华南黔桂地区的石炭系地层分布广泛, 尤其黔南地区发育完整的斜坡相碳酸盐岩序列. 其中纳庆剖面的斜坡相石炭系沉积速率快、厚度大, 基本保存了整个石炭纪牙形刺连续的演化序列, 识别出的化石带可作为我国甚至是全球对比的标准. 纳庆剖面也是未确立全球界线层型的石炭系4个阶的候选层型. 由于俄罗斯地台、顿涅茨盆地、乌拉尔、北美等地的石炭纪牙形刺研究有较长的历史, 许多牙形刺的带都是从这些地区首先建立的, 因此我国石炭纪生物地层大多沿用这些地区的划分方案. 最近10年, 纳庆剖面的牙形刺研究也取得了重要的进展, 获得了国际上的广泛关注. 纳庆剖面共识别出了26个牙形刺带, 是目前国际上单一剖面中最为完整的化石带序列, 结合华南其它地区识别出的11个牙形刺带, 我国石炭纪总计划分37个牙形刺带, 并可进行全球对比. 各个阶的牙形刺带从老到新如下, 杜内阶9个带: *Siphonodella sulcata*带、下*Si. duplicata*带、上*Si. duplicata*带、*Si. sandbergi*带、下*Si. crenulata*带、*Si. isosticha*-上*Si. crenulata*带、*Gnathodus typicus*-*G. cuneiformis*带、*G. typicus*-*Protognathodus cordiformis* 带、*Scaliognathodus anchoralis*-*G. pseudosemiglaber*带; 维宪阶4个带: *Pseudognathodus homopunctatus*带、*Lochriea commutata*带、*G. bilineatus bilineatus*带、*L. nodosa*带; 谢尔普霍夫阶3个带: *L. ziegleri*带、*G. bollandensis*带、*G. postbilineatus*带; 巴什基尔阶6个带: *Declinognathodus noduliferus* s.l.带、*Idiognathoides sinuatus*带、*Neognathodus symmetricus*带、*Idiognathodus primulus*带、*"Streptognathodus" expansus* M1带、*"S." expansus* M2 带、莫斯科阶5个带: *Diplognathodus ellesmerensis*带、*Mesogondolella donbassica*-*M. clarki*组合带、*I. podolskensis*带、*Swadelina subexcelsa*带、*Sw. makhli-*

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

年龄(Ma): 295, 300, 305, 310, 315, 320, 325, 330, 335, 340, 345, 350, 355, 360

标准年代地层 系	亚系	统	阶	俄罗斯 莫斯科盆地 阶	莫斯科盆地 亚阶	乌拉尔 亚阶	西欧 阶	西欧 亚阶	北美 阶	北美 组	中国 亚系	中国 统	中国 阶
二叠系		乌拉尔统	阿瑟尔阶	Asselian	Kholodnolo-zhskian	Shikhanian	Autunian	Kuzel	Wolfcamp-ian	Wolfcamp	下二叠统		紫松阶
石炭系	宾夕法尼亚亚系	上统	格舍尔阶	Gzhelian	Melekhovian Noginskian Pavlovoposadian Dobryatinian	Nikolskian Martukian Azantashian	Autunian Stephanian	Stephanian C	Virgilian	Wabaunsee Shawnee Douglas	壶天亚系	马平统	小独山阶
			卡西莫夫阶	Kasimovian	Dorogomilovian Khamovnikian Krevyakinian	Kerzhakovian Lomovskian	Stephanian	Stephanian B Barruelian (A)	Missourian	Lonsing Kansas City Pleasanton		马平统 威宁统	小独山阶 达拉阶
		中统	莫斯科阶	Moscovian	Myachkovian Podolskian Kashirian Vereian	Tashlian Zilimian Imendiashevian Soloncian	Westph-alian	Cantabrian Asuturian (D) Bolsovian (C)	Desmoi-nesian Atokan	Marmaton Cherokee Atoka		威宁统	达拉阶
		下统	巴什基尔阶	Bashkirian	Melekesian Chermshankian Prikamian Severokeltmenian Krasnopolyanian Voznesenskian	Asatauian Tashastian Askynbashian Akavassian Kamennogorian Bogdanovkian	Westph-alian Namurian	Duckmantian (B) Langsettian (A) Yeadonian Marsdenian Kinderscoutian Alportian Chokierian	Atokan Morrowan	Atoka Winslow Bloyd Hale		威宁统	滑石板阶 罗苏阶
	密西西比亚系	上统	谢尔普霍夫阶	Serpu-khovian	Zapaltyubian Protvian Steshevian Tarusian	Chernyshevkian Khudolazian Sunturian	Namurian	Arnsbergian Pendleian	Chesterian	Grove Church Kinkaid Degonia to Palestine Menard	丰宁亚系	大塘统	德坞阶
		中统	维宪阶	Visean	Venevian Mikhailovian Aleksinian Tulian Bobrikian Radaevkian	Bogdanovichian Averinian Kamenskoruralskian Zhukovian Ustgrekhovkian Burlian Obruchevkian	Visean	Brigantian Asbian Holkerian Arundian Chadian	Chesterian Merame-cian Osagean	Waltersburg-Haney Fraileys Beech Creek-Aux Vases Ste. Genevieve St. Louis Salem Upper Warsow Lower Warsow Keokuk		大塘统	上司阶 旧司阶
		下统	杜内阶	Tournaisian	Kosvian Kizelian Cherepetian Karakubian Upian Malevkian	Kosvian Kizelian Pershinian Rezhian upper Rezhian lower	Tournaisian	Ivorian Hastarian	Osagean Kinder-hookian	Burlington Fern-Glen Meppen Chouteau Hannibal Glen Part/ Horton Creek		岩关统	汤耙沟阶
泥盆系		上统	法门阶	Famennian	Gumerovian	Gumerovian	Famennian		Chatauquan	Louisiana	上泥盆统		邵东阶

图 1　国际上主要地区的石炭纪年代地层划分和对比

数据来自Wagner和Winkler Prins(1991、2016), Alekseev等(1996、2004), Wang和Jin(2003), Richards(2013)

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

年代地层			华南	俄罗斯(莫斯科盆地、乌拉尔)	乌克兰顿涅茨盆地	北美	主要牙形刺属延限
二叠系		298.9Ma	Streptognathodus isolatus	Streptognathodus isolatus		Streptognathodus isolatus	Hindeodus; Protognathodus; Siphonodella; Patrognathus; Gnathodus; Mestognathus; Scaliognathodus; Pseudognathodus; Cavusgnathus; Lochriea; Adetognathus; Declinognathodus; Idiognathoides; Neolochriea; Neognathodus; Idiognathodus; Swadelina; Diplognathodus; Mesogondolella; Gondolella; Streptognathodus
宾夕法尼亚亚系	格舍尔阶	303.4Ma	S. wabaunsensis; S. tenuialveus, S. virgilicus; I. simulator, I. nashuiensis	S. wabaunsensis; S. bellus, S. virgilicus; I. simulator, S. vitali	S. wabaunsensis; S. elongatus; I. simulator	S. binodosus, S. farmei; S. flexuosus, S. bellus; S. virgilicus s.l.; I. simulator, S. vitali	
	卡西莫夫阶	306.7Ma	S. zethus, I. eudoraensis; I. guizhouensis; I. turbatus, I. magnificus	S. firmus; I. toretzianus; I. sagittalis, I. cancellosus	I. toretzianus; I. sagittalis	I. zethus, I. eudoraensis; S. gracilis; I. confragus, I. cancellosus; I. turbatus, I. eccentricus	
	莫斯科阶	314.6Ma	N. roundyi; Sw. makhlinae; Sw. subexcelsa; I. podolskensis; Mesogondolella clarki-Mesogondolella donbassica; Diplognathodus ellesmerensis	Swadelina makhlinae; Swadelina subexcelsa; Neognathodus roundyi; I. podolskensis, N. inaequalis; Sw. concinnus-I. robustus; Neognathodus medadultimus; Neognathodus bothrops; "Streptognathodus" transtivus; D. donetzianus	Sw. subexcelsa; Sw. gurkovaensis; Sw. dissecta; Idognathodus izvaricus; "S." transitivus-N. atokaensis; Declinognathodus donetzianus	N. roundyi; Sw. nodocarinata; Sw. neoshoensis; I. delicatus; N. asymmetricus; I. rectus/I. iowaensis; N. caudatus; I. amplificus/I. obliquus; N. colombiensis; highest Idiognathoides; I. incurvus descendants	
	巴什基尔阶	323.2Ma	"S." expansus M2; "S." expansus M1; Idiognathodus primulus; N. symmetricus; Id. sinuatus, D. noduliferus s.l.	D. marginodosus; Idiognathodus sinuosus; N. askynensis; Id. corrugatus, D. noduliferus	D. marginodosus; Id. tuberculatus-Id. fossatus; "S." expansus; Idiognathodus sinuosus; Idiognathoides sinuatus-Idiognathoides sulcatus; D. noduliferus	N. atokaensis, I. incurvus; N. nataliae, Id. convexus; N. bassleri, I. kappleri, I. sinuosus, N. bassleri; N. symmetricus; N. higginsi, Id. sinuatus, D. noduliferus	
密西西比亚系	谢尔普霍夫阶	330.9Ma	G. postbilineatus; G. bollandensis; Lochriea ziegleri	Adetognathus unicornis; Lochriea ziegleri	G. postbilineatus; G. bollandensis-Adetognathus unicornis; Cavusgnathus naviculus-Lochriea ziegleri	Rhachistognathus muricatus; Adetognathus unicornis; Cavusgnathus naviculus	
	维宪阶	346.7Ma	Lochriea nodosa; Gnathodus bilineatus bilineatus; Lochriea commutata; Pseudognathodus homopunctatus	Lochriea nodosa; Gnathodus bilineatus bilineatus; Gnathodus texanus-Mestognathus beckmani; Dollymae bouckaerti	Lochriea nodosa; G. girtyi girtyi-L. commutata; G. texanus-L. aff. commutata	Upper Gnathodus bilineatus; Lower Gnathodus bilineatus; Hindeodus scitulus-Apatognathus scalenus; Gnathodus texanus	
	杜内阶	358.9Ma	Scaliognathodus anchoralis-G. pseudosemiglaber; G. typicus-Protognathodus. cordiformis; G. typicus-G. cuneiformis; Si. isosticha-U. Si. crenulata; Lower Si. crenulata; Siphonodella sandbergi; Si. sulcata, Si. duplicata	Scaliognathus anchoralis; Gnathodus typicus; Siphonodella isosticha; Si. quadruplicata; Si. belkai; Si. duplicata; Si. sulcata	Cavusgnathus-Polygnathodus sp. 1; Polygnathus communis communis; Spathognathodus curvatus; Siphonodella; Patrognathus andersoni	Gnathodus bulbosus; Sc. anchoralis-Do. lautus; Pseudopolygnathus multistriatus; Polygnathus communis carinus; Gnathodus punctatus; Si. isosticha-U. Si. crenulata; Lower Si. crenulata; Siphonodella sandbergi; Si. sulcata, Si. duplicata	
泥盆系			Siphonodella praesulcata	Siphonodella praesulcata		Protognathodus kuehni-Protognathodus kockeli	

图 2　中国石炭纪牙形刺生物地层及洲际对比

红色字体标注的种为石炭系各阶界线标志化石或候选标志化石(下同); 各地区牙形刺带资料: 华南(Wang, 1990; Wang和Qi, 2003; 王志浩等, 2008; 王秋来, 2014; 胡科毅, 2016; Hu等, 2017); 俄罗斯(Barskov, 1984; Kulagina等, 2001; Goreva和Alekseev, 2010); 乌克兰顿涅茨盆地(Poletaev等, 1990; Nemyrovska, 1999, 2011, 2017); 北美(Collinson等, 1971; Sandberg等, 1978; Lane和Brenckle, 2005; Barrick等, 2004, 2013). *Si.* = *Siphonodella*, *P.* = *Patrognathus*, *G.* = *Gnathodus*, *C.* = *Cavusgnathus*, *D.* = *Declinognathodus*, *Id.* = *Idiognathoides*, *S.* = *Streptognathodus*, *I.* = *Idiognathodus*, *N.* = *Neognathodus*, *Sw.* = *Swadelina*

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

*nae*带; 卡西莫夫阶5个带: *I. turbatus*带、*I. magnificus*带、*I. guizhouensis*带、*I. eudoraensis*带、*S. zethus*带; 格舍尔阶5个带: *I. simulator*带、*I. nashuiensis*带、*S. virgilicus*带、*S. tenuialveus*带、*S. wabaunsensis*带(图2).

3.1.2　有孔虫

密西西比亚纪非䗴有孔虫演化迅速, 是碳酸盐岩中的重要化石, 其精细的生物地层序列和化石带可用于区域和全球对比, 维宪阶的国际层型就是根据有孔虫*Eoparastaffella simplex*的首现来定义的(Devuyst等, 2003). 中国的密西西比亚系的有孔虫经过多年的研究(王克良, 1983; 林甲兴等, 1990; 吴祥和, 2008; Hance等, 2011; 盛青怡, 2016; Sheng等, 2018), 可识别出12个有孔虫化石带. 其中杜内阶3个带: *Plectogyra komi-Granuliferella complanata*带、*Dainella gumbeica*带、*Eoparastaffella* ex gr. *ovalis*带; 维宪阶5个带: *Eoparastaffella simplex*带、*Viseidiscus monstratus*带、*Paraarchaediscus koktjubensis*带、*Archaediscus krestovnikovi*带、*Asteroarchaediscus baschkiricus*带; 谢尔普霍夫阶4个带: *Janischewskina delicata/Plectomillerella tortula*带、*Eostaffellina paraprotvae*带、*Bradyina cribrostomata*带、*Monotaxinoides transitorius*带. 但与欧洲相比(图3), 研究精细程度还不够高, 尤其是杜内阶和维宪阶的有孔虫化石带还需要更进一步的工作.

宾夕法尼亚亚纪是䗴类有孔虫快速兴起并繁盛的时期, 世界各地的浅水台地相地层中都含有丰富的䗴类. 由于此时期强烈的构造运动使得东西海道的封闭, 全球经历了海平面的频繁变化, 作为底栖固着类型的䗴类其全球生物地理分区性变得明显, 造成了欧亚与北美的䗴类生物带之间的对比较为困难, 但欧亚内部的䗴类生物地层对比仍可进行. 中国的石炭纪䗴类生物地层研究也有很长的历史(参见Wang和Jin, 2003), 近年来的总结性工作包括张遴信等(2010)、史宇坤等(2012). 国际上, 顿涅茨盆地、俄罗斯地台的䗴类研究最详, 大多以种级分类单元的演化来划分化石带, 但我国原来的䗴带部分使用属级分类单元命名(如金玉玕等, 2000). 本文参考张遴信等(2010)划分中国的宾夕法尼亚亚系为12个䗴带, 其中巴什基尔阶4个带: *Millerella marblensis*带、*Pseudostaffella antiqua-P. antiqua posterior*带、*Pseudostaffella composite-P. paracompressa*带、*Profusulinella priscoidea-P. parva*带; 莫斯科阶5个带: *Profusulinella aljutovica-Taitzehoella taitzehoensis extensa*带、*Fusulinella obesa-F. eopulchra*带、*Fusulina lanceolate-Fusulinella vozhgalensis*带、*Fusulina pakhrensis-Pseudostaffella paradoxa*带、*Fusulina cylindrica-F. quasifusulinoides*带; 卡西莫夫阶1个带: *Montiparus weiningica-M. longissima*带; 格舍尔阶2个带: *Triticites parvulus-T. umbonoplicatus*带、*Triticites subcrassulus-T. noinskyi plicatus*带(图4).

3.1.3　菊石

早期的石炭纪生物地层学研究中, 菊石作为一种重要的生物门类在西欧地区常作为划分和对比石炭系的标准(Bisat, 1923; Schmidt, 1925; Korn和Klug, 2015), 一方面因为可在野外直接识别, 另一方面其演化的阶段性也十分明显. 但是, 随着研究的进一步深入, 菊石的区域性特征逐渐被识别出来, 一般只有属一级才可以进行大区域和洲际对比. 另外, 石炭纪的菊石化石受岩相的限制明显, 在浅水碳酸盐岩沉积相区甚少出现, 因此具有比较明显的局限性. 我国的石炭纪菊石主要分布于新疆、甘肃、宁夏、西藏、贵州、广西等地(杨逢清, 1978; 阮亦萍, 1981a, 1981b; 盛怀斌, 1983; 阮亦萍和周祖仁, 1987; 梁希洛和王明倩, 1991), 产于灰岩、钙质砂页岩及其灰岩夹层或结核中, 其产出层位是不连续的. 相比西欧种一级的分带/层, 中国石炭纪的菊石动物群常存在不同层位和不同区域菊石混生的现象, 建立的化石带也往往依靠多条剖面的综合. 近年来, 除了新疆(Zong等, 2015)以外, 相关的研究进展不多, 本文总体上依然沿用Wang和Jin(2003)总结的分带方案, 仅参考部分属种的修订对各地的分带名称或者延限作了少量调整. 整个石炭系自下而上大致可以分为13个菊石属带, 包括杜内阶3个带: *Gattendorfia*带、*Pericyclus*带、*Ammonellipsites*带; 维宪阶2个带: *Beyrichoceras*带(= B, 西欧的菊石带(Bisat, 1923; Riley, 1993), 下同)、*Goniatites*带(=P_1); 谢尔普霍夫阶1个带: *Dombarites-Eumorphoceras*带(=P_2+E); 巴什基尔阶4个带: *Homoceras*带(=H)、*Reticuloceras*带(=R_1), *Bilinguites-Cancelloceras*带(=R_2+G_1)、*Branneroceras-Gastrioceras*带(=G_2); 莫斯科阶2个带: *Winslowoceras*带、*Owenoceras*带; 卡西莫夫阶和格舍尔阶1个带: *Proud-*

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

年代地层			比利时和法国北部		华南	
			有孔虫	四射珊瑚	有孔虫	四射珊瑚
石炭系	密西西比亚系	谢尔普霍夫阶	MFZ16 (*Tubispirodiscus leckwijcki*)	RC9	*Monotaxinoides transitorius*	*Aulina rotiformis*
					Bradyina cribrostomata	
					Eostaffellina paraprotvae	
					Janischewskina delicata/ *Plectomillerella tortula*	
		维宪阶	MFZ15(*Janischewskina typica*)	RC8(*Lonsdaleia*)	*Asteroarchaediscus baschkiricus*	*Yuanophyllum*
			MFZ14(*Howchinia bradyana*)	RC7(*Dibunophyllum*)		
			MFZ13(*Neoarchaediscus*)		*Archaediscus krestovnikovi*	
			MFZ12(*Pojarkovella nibelis*)	RC6(*Lithostrotion araneum*)		
			MFZ11(*Uralodiscus rotundus*)	RC5(*Siphonodendron*)	*Paraarchaediscus koktjubensis*	*Kueichouphyllum sinense-Dorlodotia*
			MFZ10(*Planoarchaediscus*/ *Ammarchaediscus*)	RC4 (*Sychnoelasma hawbankense*)	*Viseidiscus monstratus*	*Parazaphriphyllum*
			MFZ9(*Eoparastaffella simplex*)		*Eoparastaffella simplex*	
		杜内阶	MFZ8(*Eoparastaffella* M1)		*Eoparastaffella* ex gr. *ovalis*	*K.-P.* 间隔带
			MFZ7(*Darjella monilis*)			
			MFZ6(*Tetrataxis*)	RC3(*Caninophyllum patulum*)	*Dainella gumbeica*	*Keyserlingophyllum*
			MFZ5(*Paraendothyra nalivkini*)		*Plectogyra komi-Granuliferella complanata*	
			MFZ4(*Spinochernella brencklei*)			
			MFZ3(*Pal. tchernyshinensis*)	RC2(*Siphonophyllia rivagensis*)		*Uralinia tangpakouensis*
			MFZ2(*Septabrunsiina minuta*)	RC1(*Conilophyllum*)		
			MFZ1(单房室有孔虫带)			*C.-U. t.* 间隔带
泥盆系			DFZ8	RC0	*Quasiendothyra konensis dentala*	*Cystophrentis*

图 3　西欧与中国密西西比亚纪有孔虫及四射珊瑚生物带对比

西欧有孔虫和四射珊瑚带参照Poty等(2006). *Pal.* =*Palaeospiroplectammina*; *K.-P.*间隔带= *Keyserlingophyllum-Parazaphriphyllum*间隔带; *C.-U. t.*间隔带=*Cystophrentis-Uralinia tangpakouensis*间隔带

*denites*带(图4).

3.1.4　腕足类

腕足类是石炭纪海相地层中的重要化石门类，受岩相的限制较小，生态类型多样，浅水碳酸盐地层尤其多见，斜坡相的浊流或滑塌成因沉积夹层也常有发现．密西西比亚纪的腕足类区域性较为明显，演化快，属种分异度高，属一级组合带对区域地层划分和对比意义较大；宾夕法尼亚亚纪的腕足类属种数量有所减少，属种的演化速率变慢．华南石炭系共有10个组合带：杜内阶3个带，自下而上为*Unispirifer-Yanguania*带、*Eochoristites-Martiniella*带、*Finospirifer shaoyangensis*带(金玉玕, 1961; Liao, 1995)；维宪阶3个带，*Delepinea subcarinata-Megachonetes zimmermanni*带、*Vitiliproductus groberi-Pugilis hunanensis*带、*Gigantoproductus moderatus*带(吴望始等, 1974)；谢尔普霍夫阶1个带，浅水相*Gigantoproductus edelburgensis-Gondolina-Striatifera*带，较深水相*Marginifera tenuistriata-Goniophoria carinata*带(Li, 1987)；巴什基尔阶1个带，*Choristites mansuyi-Semicostella panxianensis*带；莫斯科阶1个带，浅水相*Buxtonia grandis*带，较深水相*Alexania gratiodentalis-Nantanella mapingensis-Choristites latum*带(Li, 1987)；卡西莫夫阶和格舍尔阶1个带，*Choristites jigulensis-Protanidanthus*带(Liao, 1995)(图4).

3.1.5　四射珊瑚

四射珊瑚是石炭纪浅水相碳酸盐岩的主要化石门类，尤其是密西西比亚纪的四射珊瑚种类多、演化较快，俞建章(Yu, 1931, 1933)根据贵州南部等地材料，将密西西比亚系的四射珊瑚划分为四个带，自下而上依次为*Cystophrentis*带、*Pseudouralinia*带、*Thysano-*

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

年代地层 标准 系	标准 亚系	标准 阶	中国 亚系	中国 统	中国 阶	牙形刺	有孔虫	菊石	腕足	四射珊瑚
二叠系		阿瑟尔阶 298.9Ma	船山统		紫松阶	Streptognathodus isolatus	Sphaeroschwagerina spaerica -Pseudoschwagerina uddeni	Properrinites plummeri	Choristites jigulensis -Protanidanthus	Kepingophyllum
石炭系	宾夕法尼亚亚系	格舍尔阶 303.4Ma 卡西莫夫阶 306.7Ma	壶天亚系	马平统	小独山阶	S. wabaunsensis S. tenuialveus; S. virgilicus I. simulator; I. nashuiensis S. zethus; I. eudoraensis; I. guizhouensis I. turbatus; I. magnificus	Triticites subcrassulus-T. noinskyi plicatus T. parvulus-T. umbonoplicatus Montiparus weiningica-M. longissima	Prouddenites		Nephelophyllum-Pseudotimania
		莫斯科阶 314.6Ma		威宁统	达拉阶	N. roundyi; Swadelina makhlinae Sw. subexcelsa I. podolskensis Mesogondolella clarki-Mesogondolella donbassica Diplognathodus ellesmerensis	Fu. cylindrica-Fu. quasifusulinoides Fusulina pakhrensis-Pseudostaffella paradoxa Fusulina lanceolata-F. vozhgalensis Fusulinella obesa-F. eopulchra Profusulinella aljutovica-Ta. taitzehoensis extensa	Owenoceras Winslowoceras	Buxtonia grandis Alexania gratiodentalis-Nantanella mapingensis-Choristites latum	
		巴什基尔阶 323.2Ma			滑石板阶	"S." expansus M2 "S." expansus M1 I. primulus Neognathodus symmetricus	Pr. priscoidea-Pr. parva Ps. composite-Ps. paracompressa Pseudostaffella antiqua-Ps. antiqua posterior	Branneroceras-Gastrioceras Bilinguites-Cancelloceras Reticuloceras	Choristites mansuyi-Semicostella panxianensis	Carinthiaphyllum-Acrocyathus
					罗苏阶	Idiognathoides sinuatus Declinognathodus noduliferus s.l.	Millerella marblensis	Homoceras		
	密西西比亚系	谢尔普霍夫阶 330.9Ma	丰宁亚系	大塘统	德坞阶	G. postbilineatus G. bollandensis Lochriea ziegleri	Monotaxinoides transitorius Bradyina cribrostomata Eostaffella paraprotvae Janischewskina delicata/Plectomillerella tortula	Dombarites-Eumorphoceras	Gigantoproductus edelburgensis-Gondolina-Striatifera Marginifera tenuistriata-Goniophoria carinata	Aulina rotiformis
		维宪阶 346.7Ma			上司阶	Lochriea nodosa Gnathodus bilineatus bilineatus	Asteroarchaediscus baschkiricus Archaediscus krestovnikovi	Goniatites	Gigantoproductus moderatus Vitiliproductus groberi Pugilis hunanensis	Yuanophyllum Kueichouphyllum sinense-Dorlodotia
					旧司阶	Lochriea commutata Pseudognathodus homopunctatus	Paraarchaediscus koktjubensis Viseidiscus monstratus Eoparastaffella simplex	Beyrichoceras	Delepinea subcarinata-Megachonetes zimmermanni	Parazaphriphyllum
		杜内阶 358.9Ma		岩关统	汤粑沟阶	Scalinognathodus anchoralis-G. pseudosemiglaber G. typicus-Protognathodus cordiformis G. typicus-G. cuneiformis Si. isosticha-U Si. crenulata Lower Si. crenulata Si. sandbergi Si. sulcata; Si. duplicata	Eoparastaffella ex gr. ovalis Dainella gumbeica Plectogyra komi-Granuliferella complanata	Ammonellipsites Pericyclus Gattendorfia	Finospirifer shaoyangensis Eochoristites-Martiniella Unispirifer-Yanguania	K.-P. 间隔带 Keyserlingophyllum U. tangpakouensis C.-U. t. 间隔带
泥盆系		法门阶	上泥盆统		邵东阶	Siphonodella praesulcata	Quasiendothyra konensis dentala	Wocklumeria	Schuchertella gelaoensis	Cystophrentis

图 4 中国石炭纪生物地层对比框架

牙形刺属名见图2说明, 四射珊瑚见图3说明. *T.* = *Triticites*, *M.* = *Montiparus*, *Fu.* = *Fusilina*, *F.* = *Fusulinella*, *Pr.* = *Profusulinella*, *Ps.* = *Pseudostaffella*

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

*phyllum*带和*Yuanophyllum*带，被广泛应用于浅水相地层的划分和对比. 20世纪后期，华南及中国其他地区石炭纪珊瑚的建带工作广泛开展(参见Wang和Jin, 2003), 最为详细和完整的四射珊瑚带见于黔西、滇东的石炭系和早二叠世地层(吴望始和赵嘉明, 1989). 综合各方面成果，石炭纪四射珊瑚自下而上可划分为10个带，其中杜内阶4个带: *Cystophrentis-Uralinia tangpakouensis*间隔带、*Uralinia tangpakouensis*带、*Keyserlingophyllum*带、*Keyserlingophyllum-Pseudozaphriphyllum*间隔带; 维宪阶3个带: *Parazaphriphyllum*带、*Kueichouphyllum sinense-Dorlodotia*带、*Yuanophyllum*带; 谢尔普霍夫阶1个带: *Aulina rotiformis*带; 巴什基尔阶和莫斯科阶1个带: *Carinthiaphyllum-Acrocyathus*带; 卡西莫夫阶和格舍尔阶1个带: *Nephelophyllum-Pseudotimania*带(图4).

3.1.6 中国区域性年代地层的生物地层格架

由于历史原因及中国主要地块特殊沉积相带的发育, 目前还需暂时保留中国区域性的阶名, 但运用全球统一的国际标准年代地层框架是大势所趋. 本文参考金玉玕等(2000)的方案，把中国的石炭系划分为2个亚系、4个统及8个阶(图1、4)，从下到上各阶的生物地层框架简述如下(图4). 汤粑沟阶，可与国际标准的杜内阶对比，浅水相生物地层以贵州独山地区为代表，深水相生物地层层序可以贵州长顺的王佑组和睦化组为代表. 旧司阶, 相当于维宪阶的下部, 包括2个四射珊瑚带、1个腕足类带, 2个牙形刺带, 以有孔虫*Eoparastaffella simplex*的首现为底界. 上司阶，相当于维宪阶的上部，在浅水相区以四射珊瑚*Yuanophyllum*或者腕足类*Vitiliproductus groberi-Pugilis hunanensis*为底界，在深水相区以牙形刺*Gnathodus*、*bilineatus bilineatus*为底界. 德坞阶，可与国际标准的谢尔普霍夫阶对比，在浅水相区大致以四射珊瑚*Aulina rotiformis*或者特大型腕足类*Gigantoproductus edelburgensis*的首现为标志，在深水相区以牙形刺*Lochriea ziegleri*的首现为标志. 罗苏阶, 其底界为宾夕法尼亚亚纪的底界, 以牙形刺*Declinognathodus noduliferous* s.l.和䗴类*Millerella marblensis*的出现为标志. 滑石板阶，基本上与䗴类*Pseudostaffella*的延限带相当，包括一个腕足类的组合带，以及3个牙形刺带. 达拉阶，相当于原来的䗴类*Profusulinella* 带和*Fusulina-Fusulinella*带(金玉玕等, 2000)，被进一步细分为6个䗴带(张遴信等, 2010)，牙形刺包含6个䗴带. 小独山阶, 底界与国际标准阶卡西莫夫阶的底界相当，以䗴类 *Montiparus*或*Protriticites*的出现和 *Fusulina*, *Fusulinella* 等分子大量衰亡为标志, 上界止于 Pseudoschwagerininae亚科分子的首次出现, 包含10个牙形刺带.

3.2 层序地层和旋回地层

石炭纪的层序和高频率沉积旋回的发育与南方冈瓦纳大陆上冰川的周期性消长变化密切相关(Ross和Ross, 1988; 李儒峰等, 1997; Rygel等, 2008; Ueno等, 2013). 石炭纪冰期与间冰期的交替出现导致全球海平面频繁周期性升降，进而导致低纬度地区包括华南的旋回地层的发育. 冰期期间全球海平面的显著下降导致了华南石炭系及下二叠统出现多个暴露面、硅质碎屑岩和白云岩沉积, 无机碳氧同位素值异常, 生物灭绝和更替以及生物礁演替等事件(Wang等, 2013).

李儒峰等(1997)对华南和华北板块石炭纪沉积层序(Depositional sequence, DS)进行了系统总结，在华南，杜内阶和维宪阶分别识别出2个三级沉积层序; 谢尔普霍夫阶、巴什基尔阶、莫斯科-卡西莫夫阶下部, 各分别含有1个三级沉积层序; 卡西莫夫阶上部及格舍尔阶, 发育2个三级沉积层序. 在华北, 密西西比亚系缺失, 宾夕法尼亚亚系为海陆交互相沉积, 三级沉积层序可与华南进行对比(李儒峰等, 1997). 华南与欧美在石炭系的二级和三级沉积层序上可进行对比，特别是宾夕法尼亚亚系的莫斯科阶到格舍尔阶，全球低纬度地区都发育高频高幅的沉积层序(Ross和Ross, 1987; 李儒峰等, 1997). 最近, Ueno等(2013)在详细的䗴类生物地层学的基础上，对华南贵州紫云宗地剖面宾夕法尼亚亚系开展了高精度旋回地层学研究，以显著的暴露面为标志，从莫斯科阶到格舍尔阶的地层中共识别出21个沉积层序(DS), 其中莫斯科阶DS1-DS8, 卡西莫夫阶DS9-DS13，格舍尔阶DS14-DS21，每个旋回持续时间约400~450ka，与米兰科维奇长偏心率周期相一致(Ueno等, 2013), 它们可以与北美中大陆同时期的沉积层序(Heckel, 2008)进行很好对比.

3.3 事件地层及生物礁的演替

泥盆纪末期至石炭纪中期，全球发生了多次显著的海退事件、无机碳同位素异常、生物灭绝和更替事

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

件(Caplan和Bustin, 1999; Wang等, 2013). 泥盆纪末期, 全球发生显著的海平面下降事件, 伴随Hangenberg砂岩广泛分布和生物灭绝, 导致层孔虫、四射珊瑚、菊石、牙形刺和三叶虫等急剧减少和消亡(Caplan和Bustin, 1999; Kaiser等, 2016). 石炭纪杜内期初, 全球广泛发育微生物碳酸盐岩, 华南及中国的西北地区都可见及(侯鸿飞等, 2011; Yao等, 2016). 杜内期中期, 华南有一次显著的海退事件, 以发育硅质碎屑岩和白云岩沉积为特征, 与北美Kinderhookian期末期至Osagean期初期的海退事件相对应, 伴随无机碳同位素显著正偏(Wang等, 2013; Yao等, 2015). 之后, 海平面快速上升, 杜内期晚期在华南广西柳州龙殿山等地出现似Waulsortian相碳酸盐泥丘(Aretz等, 2012), 与同期欧洲和北美广布的Waulsortian相碳酸盐泥丘相一致(Lees和Miller, 1985). 杜内期末期, 华南出现明显的海平面降低, 发育暴露面及硅质碎屑岩沉积(Wang等, 2013), 该海退事件可与西欧对比, 对应于杜内期晚期的Waulsortian相碳酸盐泥丘的消失(Aretz和Chevalier, 2007)、浅水碳酸盐岩相区大气淡水成岩作用的增强和无机碳同位素的显著负偏(郄文昆等, 2010; Wang等, 2013). 维宪期末, 华南再次发生明显的海退事件, 与欧洲和北美同期的海退事件同步, 全球无机碳同位素正偏(Grossman等, 2008, Chen J等, 2016), 似与冈瓦纳大陆开始发育冰川沉积的时间吻合(Fielding等, 2008).

华南与全球密西西比亚纪生物礁演化过程相一致: 维宪期末的海退事件导致华南广泛发育的珊瑚礁、珊瑚层和珊瑚-微生物-苔藓虫礁消失(Aretz和Webb, 2007; Yao和Wang, 2016), 谢尔普霍夫期生物礁丰度明显降低, 仅在湖南涟源、冷水江地区可能发育珊瑚层、刺毛海绵层和微生物礁(柳祖汉, 2002; Gong等, 2012). 石炭纪中间界线附近, 伴随显著海退, 华南广泛出现暴露面和白云岩, 与冈瓦纳大陆广泛发育冰川沉积和全球无机碳氧同位素显著正偏相一致(Chen B等, 2016); 此时期的海洋动物群和生物礁发生了重要的更替, 四射珊瑚以宾夕法尼亚亚纪的复体四射珊瑚取代了密西西比亚纪的大型鳞板单体四射珊瑚为特征(Wang等, 2006, 2013; 图5); 腕足类以密西西比亚纪大型壳体腕足群如大长身贝*Gigantoproductus*演替为巴什基尔期的小型壳体腕足群如分喙石燕*Choristites*等(Wang等, 2013); 蜓类化石也从此时期开始辐射演化, 成为宾夕法尼亚亚纪浅水相地层的重要标准化石; 生物礁以宾夕法尼亚亚纪的钙藻礁取代了密西西比亚纪后期的后生动物礁(Fan和Rigby, 1994; Gong等, 2007; Yao和Wang, 2016).

3.4　碳同位素地层

海相碳酸盐岩的全岩或化石的碳同位素组成记录了地质历史时期的碳循环波动, 可以作为地层划分和对比的重要手段. 石炭纪碳同位素地层学研究始于欧美, 揭示的主要碳同位素变化事件有三次: 杜内期显著的正漂移, 最高可达5~7‰(V-PDB), 是古生代δ^{13}C值最高的时期之一(Mii等, 1999; Saltzman, 2002; Saltzman等, 2004); 谢尔普霍夫期下降(Saltzman, 2003; Batt等, 2007); 宾夕法尼亚亚纪最早期的碳同位素值显著上升, 这次上升在欧美大陆东西两岸有明显差异, 北美的碳同位素值只增加了1.5‰左右, 而同期欧洲的碳同位素值增加了3.0‰(Mii等, 1999; Bruckschen等, 1999; Veizer等, 1999; Saltzman, 2003).

华南杜内期以及维宪期早期的碳同位素记录目前主要根据碳酸盐台地相剖面的分析结果, 缺少斜坡相剖面的数据. 孤立碳酸盐岩台地的广西隆安剖面 (郄文昆等, 2010), 以及近岸浅水台地的湖南马栏边剖面(Yao等, 2015), 都记录了杜内期中期的δ^{13}C 值显著正漂移事件, 但在隆安剖面δ^{13}C 值从0‰增加到3‰, 而马栏边剖面则从0‰增加到6‰, 局部性的环境或者水文地理的差异被认为是造成这种漂移幅度差异的原因(Yao等, 2015). 隆安剖面维宪期和谢尔普霍夫期的碳同位素值和斜坡相的纳庆剖面相比, 具有一些相似的趋势, 如维宪期晚期的降低. 但二者的碳同位素数值具有一定的差异, 可能与两剖面所处位置的海洋环流或者海水深度不同, 所导致的水体化学差异有关.

黔南地区的罗甸纳庆剖面是开展石炭纪碳同位素地层学研究的理想剖面. 该剖面在石炭纪处于斜坡相环境, 出露从泥盆纪末到石炭纪末几乎完整的连续地层, 含丰富的牙形刺以及有孔虫化石, 有良好的生物地层学基础. 纳庆剖面碳酸盐全岩碳同位素分析结果显示, δ^{13}C值从维宪期的2‰上升到谢尔普霍夫期中期的4.5‰, 随后短暂地下降到谢尔普霍夫期晚期的3‰左右, 再呈现上升的趋势, 到格舍尔期的5.5‰(图5). 虽然, 碳同位素值的变化与冰川发育之间的直接联系不是十分明确, 但格舍尔期高的碳同位素值被解释为与晚古生代冰期的大规模发育有关(Buggisch等,

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

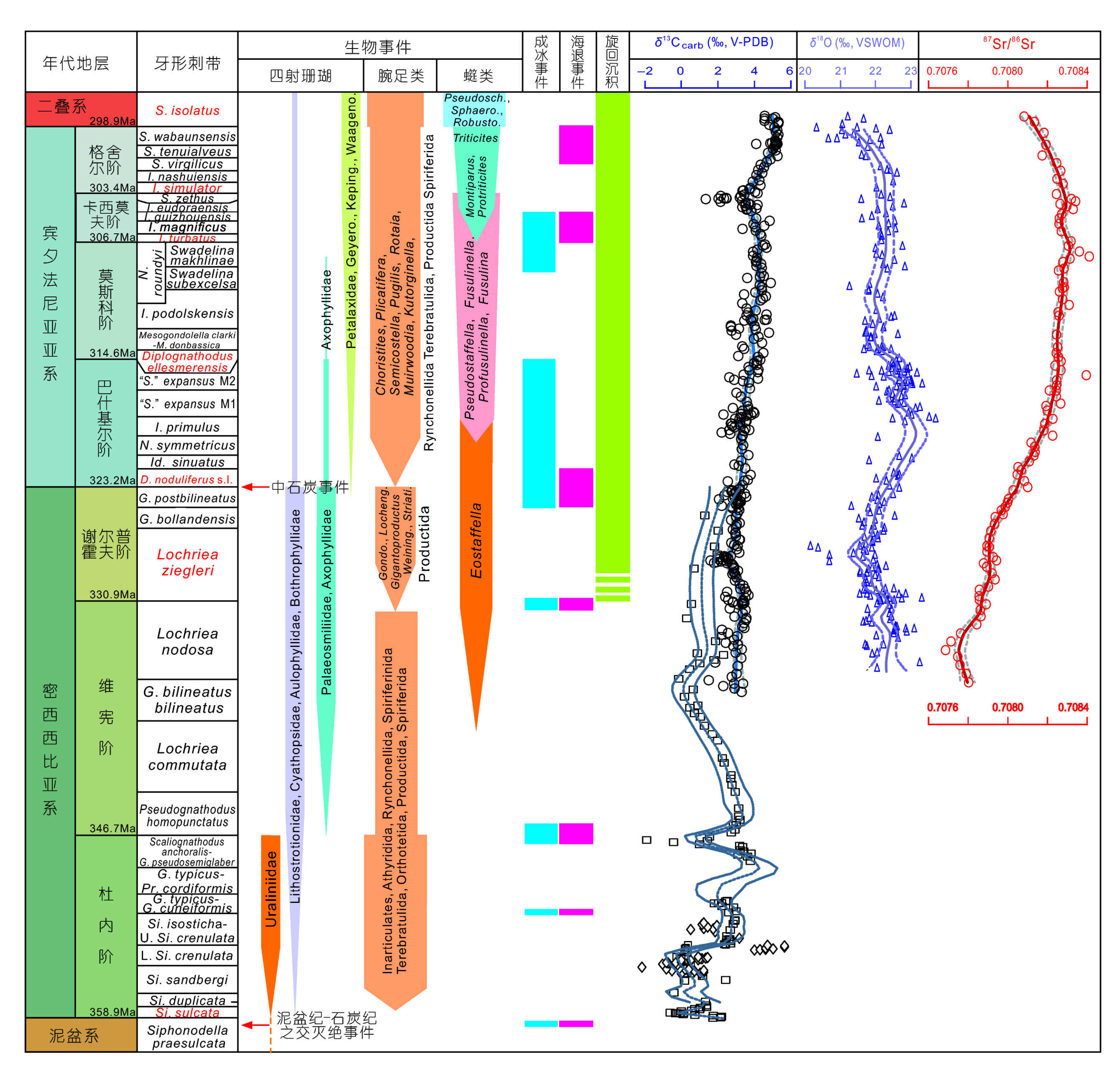


图 5　中国石炭纪生物和地质事件及化学地层

生物事件、海退事件和旋回沉积分布据Wang等(2013), 碳同位素曲线据郄文昆等(2010)和Buggisch等(2011), 牙形刺氧同位素曲线据Chen B等(2016), 牙形刺锶同位素曲线根据Chen等(2018). 牙形刺属名见图2说明. Geyero.=Geyerophyllidae, Keping.=Kepingophyllidae, Waageno.=Waagenophyllinae, *Pseudosch*. =*Pseudoschwagerina*, *Sphaero*.=*Sphaeroschwagerina*, *Robusto*.=*Robustoschwagerina*

2011), 因为高的碳同位素值一般认为与有机碳埋藏量的增加有关, 而有机碳埋藏量的增加通常会导致大气中CO_2含量的下降(Mii等, 1999; Saltzman, 2002, 2003; Saltzman等, 2004; Buggisch等, 2008), 从而为触发冰川大规模的发育创造条件. 值得注意的是, 一些台地相剖面的碳同位素值在格舍尔期最低(Buggisch等, 2011), 这一低的$\delta^{13}C$值被解释为由冰川发育导致的海平面下降所引起的碳酸盐台地大规模暴露于海平面之上, 受到淡水强烈淋滤作用的结果(Buggisch等, 2011).

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

3.5　牙形刺氧同位素地层

化石骨骼(碳酸钙或磷酸钙)的氧同位素值反映其形成时期海水的氧同位素组成，可进一步推算海水的温度．石炭纪到二叠纪是地质历史上重要的成冰期，利用化石的氧同位素值推算的古温度，可以重建石炭纪-二叠纪冰期的变化规律．Grossman等(2008)利用北美和俄罗斯地台的腕足类化石壳体，重建了石炭纪的氧同位素变化规律，发现在北美大陆，氧同位素值在杜内期到维宪期中期有~3‰(V-PDB)的增加；然后小幅下降，石炭纪中间界线附近有1~2‰的增加，而整个宾夕法尼亚亚纪保持在相对稳定的–3~–1‰之间. 在俄罗斯地台, 石炭纪中间界线附近氧同位素值增加了3‰(V-PDB)左右．Buggisch等(2008)研究了欧洲和北美的石炭纪牙形刺磷酸盐的氧同位素组成，发现两次明显的正漂移事件，一次是杜内期2‰(V-SWOW)左右，一次是巴什基尔期初1.5‰(V-SWOW)左右．作者认为其与石炭纪冰期的大规模发育有关，因为冰川通常富集^{16}O, 冰川的发育导致^{16}O被大量储存在冰中，使得在海水中^{18}O的相对含量增加, 因此碳酸钙或磷酸钙组成的化石的δ^{18}O值增加通常被认为是反映冰川大规模发育的重要特征.

最近Chen B等(2016)对华南纳庆剖面的石炭纪和二叠纪牙形刺进行了系统的氧同位素分析(图5)，发现在维宪期末至谢尔普霍夫早期，氧同位素值短暂的下降到21.5‰, 后开始显著上升, 并在巴什基尔期达到最高值23‰，这也是华南整个石炭纪和二叠纪氧同位素记录的最高值，然后在莫斯科期的早期开始下降到22‰左右, 并在格舍尔期进一步下降到21.5‰. 综合石炭纪不同区域的氧同位素数据，发现有两次显著的增加，分别在杜内期和石炭纪中间界线附近．其中杜内期的增加特别是维宪期的高值在北美被认为可能与局部干旱气候有关(Grossman等, 2008)，而俄罗斯地台和华南目前缺少这一时期的数据，因此是否具有全球性意义还需要进一步证实．石炭纪中间界线附近最大的氧同位素值增加事件具有全球意义，可能指示晚古生代冰期的最大规模时期(Chen B等, 2016). 这次最大规模冰川事件的其他证据还体现在，腕足类化石壳体的碳、锶同位素也在这个时期有大幅度的增加，前者反映有机碳埋藏量增加，后者反映了风化作用的增强，二者都有可能触发气候变冷(Bruckschen等，1999；Grossman等, 2008)；更进一步的证据还包括北美、俄罗斯、华南等低纬度地区密西西比亚纪末期至宾夕法尼亚亚纪初期所记录的显著的海平面下降事件和不整合暴露面 (Ross和Ross, 1987; Alekseev等, 1996; Eros等, 2012; Wang等, 2013).

3.6　锶同位素地层

由于锶同位素在海水中的滞留时间远大于海水的自混合时间，在任何给定的地质时间内海水中的锶同位素在全球是均一的，因此，锶同位素(^{87}Sr/^{86}Sr)变化可用来进行地层对比和测年(McArthur等, 2012). 海水锶同位素值主要受控于大陆风化带入的较高值的锶组分和由地幔溢出的较低值的锶组分，因此海水锶同位素也可以反映大陆风化速率、构造运动、以及古气候状况等(Kump和Arthur, 1997; Chen等, 2018). 以往石炭纪锶同位素曲线的建立主要基于北美和东欧陆表海盆地产出的腕足动物的壳(Bruckschen等, 1995, 1999), 但由于这两个地区的石炭纪地层不连续，存在较多的地层缺失或间断．另外，部分腕足动物壳的方解石可能受到成岩作用影响，导致很多锶同位素值较为分散. Chen等(2018)对华南纳庆剖面的石炭纪和早二叠世牙形刺进行了系统的锶同位素分析(图5)，结果表明该曲线与前人发表数据较为一致，尤其与产自泛大洋中的日本Akiyoshi地块的腕足动物壳的锶同位素基本一致(Brand等，2009)，也与俄罗斯乌拉尔山脉的牙形刺锶同位素较为一致(Henderson等，2012)．纳庆剖面是位于古特提斯洋东部连续的碳酸盐斜坡相沉积序列，辅以高精度的牙形刺生物地层，因此，新建立的纳庆剖面的锶同位素数据是国际上迄今最为完善的单剖面锶同位素变化曲线，为全球石炭纪地层对比提供了较为可靠的依据.

石炭纪锶同位素变化曲线可分为4个阶段：(1) 从泥盆-石炭纪界线处的高值(~0.7084)开始下降，到维宪中期达到最低值(~0.7076); (2) 然后开始上升，到巴什基尔的中晚期(~318Ma)再次达到高峰(0.7083); (3) 之后有大约15个百万年(318~303Ma)的平台期; (4) 到格舍尔早期(~303Ma)开始下降，一直持续到整个二叠纪(Veizer等，1999; Chen等，2018). 通过对石炭纪全球事件系统综述，Chen等(2018)认为, 锶同位素在维宪期中期开始的持续升高，很可能是由海西运动导致欧美大陆在赤道附近的隆升及其随之而来的强烈风化作用导

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

致, 而且可能也与逐渐繁盛的最古老的热带雨林(增强风化作用)有关. 而巴什基尔期中晚期至格舍尔期早期的锶同位素高值则可能是由古陆隆升逐渐西移, 风化作用持续高强所致. 格舍尔期早期开始的锶同位素的下降, 在时间上, 与热带雨林的更替事件以及欧美大陆赤道附近广泛发育的干旱事件高度一致, 表明是由大陆风化作用减弱导致. 二叠纪早期的锶同位素下降, 则可能与玄武岩喷发及新特提斯洋的形成有关.

4 中国石炭系各岩石地层大区的对比

中国石炭纪岩石地层区划分为4个地层大区及11个地层区(金玉玕等, 2000; Wang和Jin, 2003), 从北向南主要地层区的石炭系沉积简述如下(图6).

(1) 准噶尔-兴安大区, 自西向东可划分为准噶尔区、内蒙古-吉林区、兴安区. 准噶尔区的石炭系由碎屑岩、灰岩及火山岩构成; 内蒙古-吉林区的石炭系以巨厚硅质碎屑和碳酸盐碎屑浊流沉积为主. 石炭纪动物群属于北方区系, 植物群属于安加拉区系.

(2) 塔里木-华北大区, 可划分为塔里木区、华北区和祁连-贺兰山区. 除塔里木北缘、华北台地西南缘保存了深水沉积外, 各处的石炭系均为稳定沉积. 动物群属于特提斯区系, 植物群从欧美区系逐渐发展为华夏区系.

(3) 羌塘-华南大区, 可划分为羌塘-横断山区和华南区本体两地层区. 此大区的石炭系层序完整, 以碳酸盐台地沉积为主. 动物群属典型的特提斯区系, 植物群从欧美区系发展为华夏区系.

(4) 西藏-滇西大区, 可划分为藏南区、冈底斯区和滇西区, 属于冈瓦纳大陆北缘沉积区, 密西西比亚系以陆棚碳酸盐或碎屑沉积为主, 宾夕法尼亚亚系缺少或者以杂砾岩和火山岩发育为特征. 动物群属于冈瓦纳区系.

各个大区典型的石炭系的对比见图6.

5 国际石炭系未确定阶的标志化石及候选层型

石炭纪全球界线层型研究的困难主要在于强烈的古生物地理分区性, 由于石炭纪冰期和间冰期形成的强烈气候分异, 以及古地理的隔离, 造成了各个大区之间海洋生物的交流不畅, 全球生物地层对比困难. 目前石炭系尚有4个阶的底界界线层型没有确立, 分别是密西西比亚系的谢尔普霍夫阶, 宾夕法尼亚亚系的莫斯科阶、卡西莫夫阶、格舍尔阶, 牙形刺是这4个阶底界层型的首选化石类群, 其次是有孔虫(䗴类)和菊石等. 谢尔普霍夫阶底界的标志化石尽管还没有确立, 但国际石炭系界线工作组重点研究牙形刺*Lochriea nodosa-L. ziegleri*的演化序列, 以后者的出现作为此阶的开始, *L. ziegleri*在全球主要的海相沉积盆地都有出现. 候选层型剖面目前有两个. 一是俄罗斯南乌拉尔的Verkhnyaya Kardailovka剖面. 据俄罗斯研究者报道此剖面有牙形刺*Lochriea nodosa-L. ziegleri*的连续演变序列, 但其他典型谢尔普霍夫阶底部的牙形刺如*L. senckenbergica*等未见及, 典型的谢尔普霍夫阶底界的有孔虫*Asteroarchaediscus postrugosus*则出现在*L. ziegleri*首现层位之上7m. 第二个候选层型剖面是我国贵州的罗甸纳庆剖面, 为连续的薄至中层状灰岩沉积, 几乎每个灰岩单层都含丰富的牙形刺化石, 每公斤灰岩样品平均含大约100枚牙形刺个体, 产出*Lochriea nodosa-L. ziegleri*的连续演变序列, 以及丰富的标志谢尔普霍夫阶底部的牙形刺分子如*L. cruciformis*、*L. senckenbergica*等, 并在*L. ziegleri*首现层位之上2.15m处发现了标志谢尔普霍夫阶底界的有孔虫化石*Janischewskina delicata*.

莫斯科阶的底界界线层型剖面的研究没有取得实质性的进展, 界线工作组提出的候选方案, 有牙形刺*Declinognathodus marginodosus-D. donetzianus*演化序列、*Diplognathodus* aff. *orphanus-Di. ellesmerensis*演化序列、䗴类*Profusulinella*演化序列中某种的首现、*Verella-Eofusulina*演化序列中后者的首现等四种方案. 牙形刺*D. donetzianus*首现的层位最接近传统的莫斯科阶的底界, 但分布较为局限, 且在我国还没有发现; *Di. ellesmerensis*的首现层位也较接近传统的莫斯科阶的底界, 它的分布广泛, 特征明显, 易于识别, 具有较强的全球对比的潜力(Qi等, 2016). 由于区域性明显, 寻找在全球各个区都有分布的䗴类种比较困难. 目前的候选层型剖面包括俄罗斯南乌拉尔的Basu剖面和罗甸纳庆剖面. Basu剖面保存有*Declinognathodus marginodosus-D. donetzianus*的连续演化序列, 以及䗴类*Depratina prisca*; 纳庆剖面没有出现*D. donetzianus*, 但有非常丰富的标志此界线的牙形刺*Di. ellesmerensis*, 也含有

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

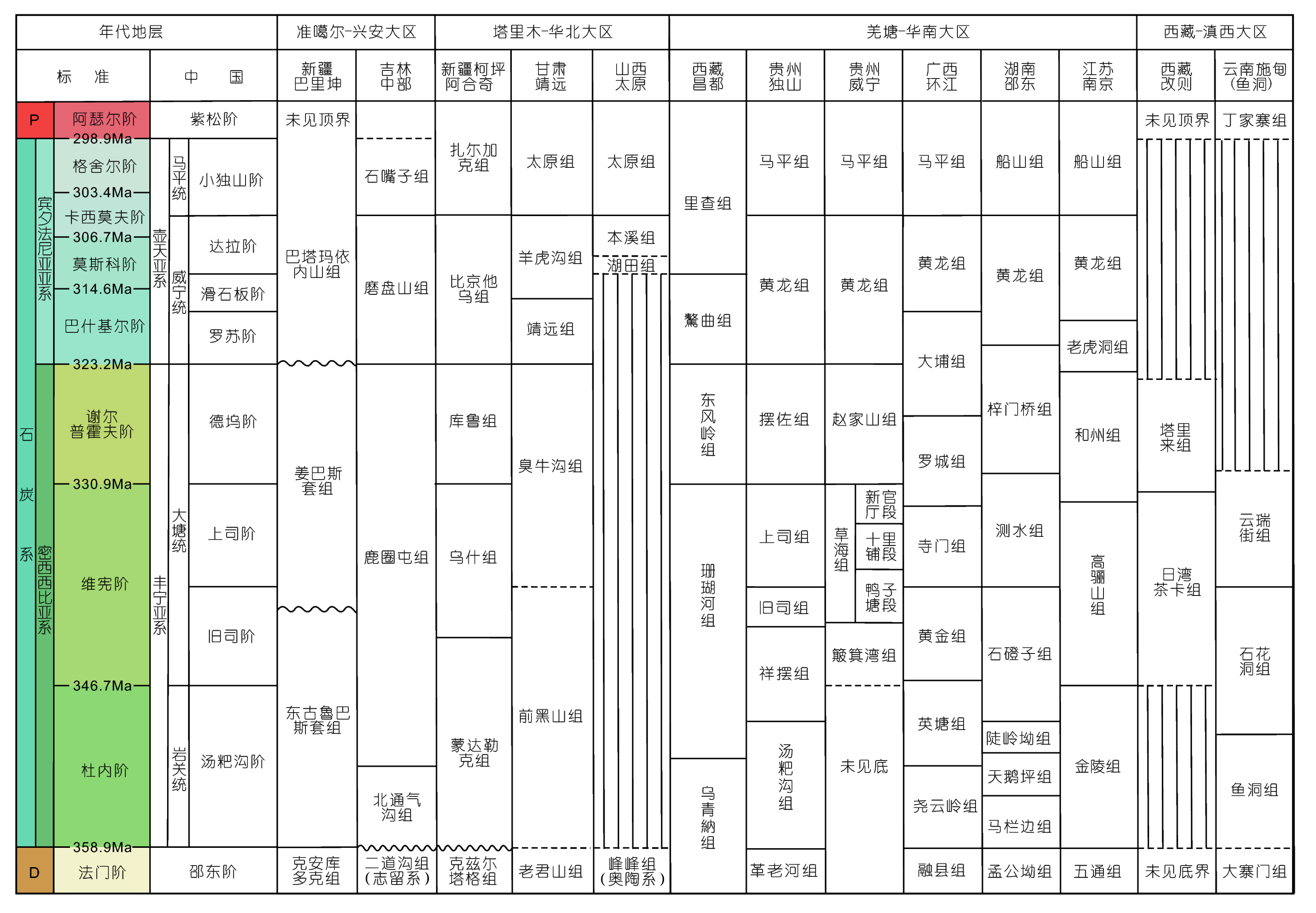


图 6 中国石炭纪岩石地层分区及对比

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

蜓类*Profusulinella*等(Wang等, 2011).

卡西莫夫阶的底界界线层型的主导门类化石也是牙形刺, *Idiognathodus turbatus*和*I. sagittalis*最具有潜力, 二者的首现层位接近, 比传统的卡西莫夫阶底界要高约一个亚阶(Villa和Task Group, 2008). 但最近, Rosscoe和Barrick(2013)建立了新种*I. heckeli*, 认为它是*I. turbatus*的直接祖先种. 该种首现层位较其后裔种*I. turbatus*和/或*I. sagittalis*更接近于初始海泛面, 也更接近于传统的卡西莫夫阶底界(Ueno和Task Group, 2014). 俄罗斯学者最近还建议以*Swadelina subexcelsa*的首现作为卡西莫夫阶底界标志, 以此恢复传统的卡西莫夫阶的定义. 在浅水相区, 蜓类如*Protriticites*和*Montiparus*等的首现可以作为辅助标志化石. 目前候选层型剖面包括: 俄罗斯乌拉尔的Usolka剖面, 发育有牙形刺*I. sagittalis*及蜓类化石, 但此剖面非单一岩相, 为泥岩和灰岩互层; 俄罗斯莫斯科盆地Afanasievo剖面, 发育有丰富的包括*Montiparus*的蜓类化石, 及牙形刺*I. sagittalis*和*Sw. subexcelsa*, 但为典型的浅水相剖面, 具多个代表暴露面的古土壤层及沉积间断(Goreva等, 2009); 贵州罗甸纳庆剖面, 发育有牙形刺*I. swadei*-*I. heckeli*-*I. turbatus*演化谱系和牙形刺*Sw. subexcelsa*(祁玉平等, 2012; Hu和Qi, 2017), 还见有少量的蜓类化石.

格舍尔阶的底界是以牙形刺*Idiognathodus simulator*的首现作为标志(Heckel等, 2008), 但其直接的祖先分子还没有找到, 所以其演化谱系仍不清楚. *Idiognathodus eudoraensis*与*I. simulator*有亲缘关系, 但不是它的直接祖先, 难以建立完整的演化谱系可能是因为此界线刚好落在全球海退的时期. 目前候选层型剖面有三个: 俄罗斯乌拉尔的Usolka剖面, 出现了*I. simulator*, 并有丰富的蜓类*Rauserites*, 但界线附近是泥岩和灰岩互层的非单一岩相; 俄罗斯莫斯科盆地的Gzhel剖面, 为格舍尔阶的命名剖面, 产界线标志分子的牙形刺*I. simulator*, 及可能作为辅助界线标志的蜓类*Rauserites rossicus*, 但此为典型的浅水相剖面, 出现*I. simulator*层之下1米就有一个大的沉积间断面; 贵州罗甸纳庆剖面, 出现了*I. simulator*, 并产有在形态上与此标志分子过渡的一些牙形刺化石, 但蜓类化石不甚丰富.

6 总结和讨论

通过一个多世纪的努力, 主要基于华南的材料, 以生物地层学为基础运用多重地层划分和对比手段, 建立了中国石炭纪年代地层框架. 中国石炭纪高精度的生物地层学包括: 牙形刺划分为37个带, 有孔虫(蜓类)24个带, 菊石13个带, 腕足类10个带, 四射珊瑚10个带. 因历史原因, 目前仍保留中国区域性的年代地层框架, 2个亚系4个统8个阶, 通过生物地层学可与国际标准年代地层及世界各地的区域性年代地层框架对比. 中国石炭纪化学地层、层序地层、旋回地层、事件地层等的研究也已经取得了重要的进展, 可与国际上其他地区进行对比.

中国石炭纪放射性同位素测年的研究相对比较薄弱, 迄今还没有找到原生的石炭纪火山灰层. 近年来, 国际上石炭纪的同位素年龄主要根据德国莱茵地区泥盆系-石炭系界线层, 以及乌克兰的顿涅茨盆地和俄罗斯的南乌拉尔地区的宾夕法尼亚亚系地层, 运用铀-铅ID-TIMS测定方法得到了较为精确的数据(Trapp等, 2004; Davydov等, 2010). 中国石炭纪的磁性地层学研究也未有进展, 主要是华南的石炭系经过了多次的构造运动, 多次热事件导致了石炭系的重磁化. 国际上石炭纪的磁性地层学也没有获得较好的发展, 一方面因为广泛的重磁化现象, 另一方面是从宾夕法尼亚亚纪开始石炭纪处于一个超级反极性带(PCRS)时期(Tarling, 1991). 但近年的研究显示, 宾夕法尼亚亚纪-早二叠世的超级反极性带内部可能能够识别出一些正极性带, 在维宪期到谢尔普霍夫期也可识别出多达16个正极性带, 可很好地用于对比地层(Hounslow等, 2004).

石炭纪是晚古生代冰期发育的高峰期, 古环境与生物演化相结合的研究是目前国际上的重大研究课题. 我国发育有不同沉积类型和不同沉积相的石炭系, 可通过反映不同环境指标的同位素地球化学如锶同位素、氧同位素等方法, 以及通过保存的植物气孔指数等加强我国石炭纪古环境和古气候的研究. 在地层学研究方面, 应加强浅水台地相与斜坡相地层、海相与陆相地层的对比研究, 以及高分辨率天文年代旋回地层研究等, 提高中国年代地层学的研究水平和国际地位.

参考文献

陈旭. 1934a. 广西黄龙及马平灰岩中的蜓科. (前)中央研究院地质研究所西文集刊, 14号: 33–54

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

陈旭. 1934b. 中国南部之蠖科化石. 中国古生物志, 乙种, 4: 1–185
侯鸿飞, 王增吉, 吴祥和, 杨式溥. 1982. 中国的石炭系. 见: 中国地层(1): 中国地层概论. 北京: 地质出版社. 187–218
侯鸿飞, 吴祥和, 周怀玲, Hance L, Devuyst F X, Sevastopulo G. 2013. 石炭系密西西比亚系中统维宪阶全球标准层型剖面和点位. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 中国"金钉子"——全球标准层型剖面和点位研究. 杭州: 浙江大学出版社. 215–239
侯鸿飞, 周怀岭, 刘建波. 2011. 湖南台地泥盆纪末绝灭事件后的微生物沉积. 地质学报, 85: 145–156
胡科毅. 2016. 华南宾夕法尼亚亚纪早-中期的牙形刺序列及全球对比. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–289
金玉玕. 1961. 下扬子区金陵组腕足类化石的新资料. 古生物学报, 9: 272–290
金玉玕, 范影年, 王向东, 王仁农. 2000. 中国地层典: 石炭系. 北京: 地质出版社. 138
李儒峰, 刘本培, 赵澄林. 1997. 扬子板块石炭纪沉积层序及其全球性对比研究. 沉积学报, 15: 23–28
李四光. 1927. 中国北部之蠖类(即纺锤虫). 中国古生物志, 乙种, 4: 1–172
梁希洛, 王明倩. 1991. 新疆石炭纪头足类. 中国古生物志, 新乙种, 27: 1–171
林甲兴, 李家骧, 孙全英. 1990. 华南地区晚古生代有孔虫. 北京: 科学出版社. 297
柳祖汉. 2002. 对比日本秋吉生物礁论湖南石炭纪生物成礁条件. 地质科学, 37: 38–46
祁玉平, 胡科毅, Barrick J E, 王秋来, 林巍. 2012. 牙形刺*Idiognathodus swadei-I. turbatus*演化谱系在华南的发现及意义. 地层学杂志, 36: 551–557
郄文昆, 张雄华, 杜远生, 张扬. 2010. 华南地区下石炭亚系碳同位素记录及对晚古生代冰期的响应. 中国科学: 地球科学, 40: 1533–1542
阮亦萍. 1981a. 广西、贵州泥盆纪和早石炭世早期菊石群. 中国科学院南京地质古生物研究所集刊, 15: 1–152
阮亦萍. 1981b. 广西南丹七圩石炭纪菊石. 中国科学院南京地质古生物研究所集刊, 15: 152–232
阮亦萍, 周祖仁. 1987. 宁夏石炭纪头足类. 见: 宁夏地质矿产局和中国科学院南京地质古生物研究所, 编. 宁夏纳缪尔期地层和古生物. 南京: 南京大学出版社. 55–177
芮琳, 王志浩, 张遴信. 1987. 罗苏阶-上石炭统底部一个新的年代地层单位. 地层学杂志, 11: 103–115
盛怀斌. 1983. 藏北申扎县永珠早石炭世晚期菊石动物群. 青藏高原地质文集, 8: 41–68
盛青怡. 2016. 华南密西西比亚纪有孔虫. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–285
史宇坤, 杨湘宁, 刘家润. 2012. 贵州南部宗地地区早石炭世-早二叠世的蠖类. 北京: 科学出版社. 271
王克良. 1983. 湖南邵阳地区早石炭世的有孔虫. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 6: 209–224
王秋来. 2014. 华南卡西莫夫阶与格舍尔阶界线层的牙形刺. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–107
王向东, 金玉玕. 2000. 石炭纪年代地层学研究概况. 地层学杂志, 24: 90–98
王向东, 金玉玕. 2005. 石炭系全球界线层型研究进展. 地层学杂志, 29: 147–153
王志浩, 祁玉平, 王向东. 2008. 华南贵州罗甸纳水剖面宾夕法尼亚亚系各阶之界线. 微体古生物学报, 25: 205–214
吴望始, 张遴信, 金玉玕. 1974. 贵州西部的石炭系. 中国科学院南京地质古生物集刊, 6: 72–87
吴望始, 赵嘉明. 1989. 黔西、滇东石炭纪和早二叠纪早期的四射珊瑚. 北京: 科学出版社. 230
吴祥和. 2008. 中国下石炭统德坞阶综合研究报告. 见: 第三届全国地层委员会编, 中国主要断代地层建阶研究报告(2001–2005). 北京: 地质出版社. 255–286
杨逢清. 1978. 贵州西部下、中石炭统及菊石动物群. 地层古生物论文集, 5: 143–200
杨敬之, 盛金章, 吴望始, 陆麟黄. 1962. 中国的石炭系. 见: 全国地层会议学术报告汇编. 北京: 科学出版社. 1–108
杨敬之, 吴望始, 张遴信, 廖卓庭, 阮亦萍. 1979. 我国石炭系分统的再认识. 地层学杂志, 3: 188–192
尹赞勋. 1932. 中国北部本溪系及太原系之腹足类化石. 中国古生物志, 乙种, 11: 1–53
尹赞勋. 1933. 中国北部本溪系及太原系之头足类化石. 中国古生物志, 乙种, 11: 1–46
张遴信, 周建平, 盛金章. 2010. 贵州西部晚石炭世和早二叠世的蠖类. 北京: 科学出版社. 296
张正华, 王治华, 李昌全. 1988. 黔南二叠纪地层. 贵阳: 贵州人民出版社. 113
赵亚曾. 1927. 中国长身贝科化石(上卷). 中国古生物志, 乙种, 5: 1–244
赵亚曾. 1928. 中国长身贝科化石(下卷). 中国古生物志, 乙种, 5: 1–100
赵亚曾. 1929. 中国石炭纪及二叠纪石燕化石. 中国古生物志, 乙种, 11: 1–6
Alekseev A S, Goreva N V, Isakova T N, Makhlina M Kh. 2004. Biostratigraphy of the Carboniferous in the Moscow Syneclise, Russia. Newsl Carb Stratigr, 22: 28–35
Alekseev A S, Kononova L I, Nikishin A M. 1996. The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syneclise (Russian Platform): Stratigraphy and sea-level changes. Tectonophysics, 268: 149–168
Aretz M, Chevalier E. 2007. After the collapse of stromatoporid-coral reefs-the Famennian and Dinantian reefs of Belgium: Much more than Waulsortian mounds. Geol Soc Spec Publl, 275: 163–188

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

Aretz M, Poty E, Devuyst F X, Hance L, Hou H. 2012. Late Tournaisian Waulsortian-like carbonate mud banks from South China (Longdianshan Hill, central Guangxi): Preliminary investigations. Geol J, 47: 450–461

Aretz M, Webb G E. 2007. Western European and eastern Australian Mississippian shallow-water reefs: A comparison. In: Wong T E, ed. Proceedings of the XVth International Congress on Carboniferous and Permian Stratigraphy. Utrecht, the Netherlands, 10–16 August 2003. Den Haag: Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences. 433–442

Barrick J E, Heckel P H, Lambert L L, Darwin R B. 2004. Pennsylvanian conodont zonation for Midcontinent North America. Rev Espan Micropaleontol, 36: 231–250

Barrick J E, Lambert L L, Heckel P H, Rosscoe S J, Boardman D R. 2013. Midcontinent Pennsylvanian conodont zonation. Stratigraphy, 10: 55–72

Barskov I S. 1984. Upper Carboniferous and Permian (Asselian) conodont zonation and zonal scale and problems of its perfection. In: Menner V V, Grigorieva A D, eds. Upper Carboniferous of the USSR. Proceedings of the Interdepartmental Stratigraphic Committee of the USSR. 13: 102–107

Batt L S, Montañez I P, Isaacson P, Pope M C, Butts S H, Abplanalp J. 2007. Multi-carbonate component reconstruction of mid-Carboniferous (Chesterian) seawater δ^{13}C. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 256: 298–318

Berner R A. 1990. Atmospheric carbon dioxide levels over Phanerozoic time. Science, 249: 1382–1386

Berner R A. 1997. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO_2. Science, 276: 544–546

Bisat W S. 1923. The Carboniferous goniatites of the north of England and their zones. Proc Yorkshire Geol Soc, 20: 40–124

Brand U, Tazawa J I, Sano H, Azmy K, Lee X, 2009. Is mid-late Paleozoic ocean-water chemistry coupled with epeiric seawater isotope records? Geology, 37: 823–826

Bruckschen P, Bruhn F, Veizer J, Buhl D. 1995. isotopic evolution of Lower Carboniferous seawater: Dinantian of western Europe. Sediment Geol, 100: 63–81

Bruckschen P, Oesmann S, Veizer J. 1999. Isotope stratigraphy of the European Carboniferous: Proxy signals for ocean chemistry, climate and tectonics. Chem Geol, 161: 127–163

Buggisch W, Joachimski M M, Sevastopulo G, Morrow J R. 2008. Mississippian $\delta^{13}C_{carb}$ and conodont apatite δ^{18}O records — Their relation to the Late Palaeozoic Glaciation. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 268: 273–292

Buggisch W, Wang X, Alekseev A S, Joachimski M M. 2011. Carboniferous-Permian carbon isotope stratigraphy of successions from China (Yangtze platform), USA (Kansas) and Russia (Moscow Basin and Urals). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 301: 18–38

Caplan M L, Bustin R M. 1999. Devonian-Carboniferous Hangenberg mass extinction event, widespread organic-rich mudrock and anoxia: Causes and consequences. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 148: 187–207

Chen B, Joachimski M M, Wang X, Shen S, Qi Y, Qie W. 2016. Ice volume and paleoclimate history of the Late Paleozoic Ice Age from conodont apatite oxygen isotopes from Naqing (Guizhou, China). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 151–161

Chen J, Montañez I P, Qi Y, Wang X, Wang Q, Lin W. 2016. Coupled sedimentary and δ^{13}C records of late Mississippian platform-to-slope successions from South China: Insight into δ^{13}C chemostratigraphy. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 162–178

Chen J, Montañez I P, Qi Y, Shen S, Wang X. 2018. Strontium and carbon isotopic evidence for decoupling of pCO_2 from continental weathering at the apex of the late Paleozoic glaciation. Geology, 46: 395–398

Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, Fan J X. 2013. The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes, 36: 199–204

Collinson C, Rexroad C B, Thompson T L. 1971. Conodont Zonation of the North American Mississippian. Geol Soc Am Mem, 127: 358–394

Danshin B M. 1947. Geological Structure and Minerals of Moscow and its Environs. Moscow: Moscow Society of Naturalist Press. 308

Davydov V I, Crowley J L, Schmitz M D, Poletaev V I. 2010. High-precision U-Pb zircon age calibration of the global Carboniferous time scale and Milankovitch band cyclicity in the Donets Basin, eastern Ukraine. Geochem Geophys Geosyst, 11: Q0AA04–22

Devuyst F X, Hance L, Hou H F, Wu X H, Tian S G, Coen M, Sevastopulo G. 2003. A proposed global stratotype section and point for the base of the Visean Stage (Carboniferous): The Pengchong section, Guangxi, South China. Episodes, 26: 105–115

Eros J M, Montañez I P, Osleger D A, Davydov V I, Nemyrovska T I, Poletaev V I, Zhykalyak M V. 2012. Sequence stratigraphy and onlap history of the Donets Basin, Ukraine: Insight into Carboniferous icehouse dynamics. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 313-314: 1–25

Fan J S, Rigby J K. 1994. Upper carboniferous phylloid algal mounds in South Guizhou, China. Brigham Young University Geology Studies, 40: 17–24

Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P, Rygel M C, Jones A T, Roberts J. 2008. Stratigraphic imprint of the Late Palaeozoic Ice Age in eastern Australia: A record of alternating glacial and nonglacial climate regime. J Geol Soc, 165: 129–140

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

Gong E P, Samankassou E, Guan C Q, Zhang Y L, Sun B L. 2007. Paleoecology of Pennsylvanian phylloid algal buildups in south Guizhou, China. Facies, 54: 615–623
Gong E P, Zhang Y L, Guan C Q. 2012. The Carboniferous reefs in China. J Palaeogeogr, 1: 27-42
Goreva N V, Alekseev A S. 2010. Upper carboniferous conodont zones of Russia and their global correlation. Stratigr Geol Correl, 18: 593–606
Goreva N, Alekseev A, Isakova T, Kossovaya O. 2009. Biostratigraphical analysis of the Moscovian-Kasimovian transition at the neostratotype of Kasimovian Stage (Afanasievo section, Moscow Basin, Russia). Palaeoworld, 18: 102–113
Grabau A W. 1936. Fauna of the Maping Limestone of Kwangsi and Kweichow. Palaeontol Sin Ser B, 8: 1–441
Grossman E L, Yancey T E, Jones T E, Bruckschen P, Chuvashov B, Mazzullo S J, Mii H. 2008. Glaciation, aridification, and carbon sequestration in the Permo-Carboniferous: The isotopic record from low latitudes. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 268: 222–233
Hance L, Hou H F, Vachard D. 2011. Upper Famennian to Visean foraminifers and some carbonate microproblematica from South China-Hunan, Guangxi and Guizhou. Beijing: Geological Publishing House. 359
Hance L, Poty E, Devuyst F X. 2006a. Tournaisian. In: Dejonghe L, ed. Current Status of Chronostratigraphic Units Named from Belgium and Adjacent Areas. Geol Belgica, 9: 47–53
Hance L, Poty E, Devuyst F X. 2006b. Visean. In: Dejonghe L, ed. Current Status of Chronostratigraphic Units Named from Belgium and Adjacent Areas. Geol Belgica, 9: 55–62
Heckel P H. 2001. New proposal for series and stage subdivision of Carboniferous System. Newsl Carb Stratigr, 19: 12–14
Heckel P H. 2008. Pennsylvanian cyclothems in Midcontinent North America as far-field effects of waxing and waning of Gondwana ice sheets. Geol Soc Am Boulder Spec Publ, 441: 275–289
Heckel P H, Alekseev A S, Barrick J E, Boardman D R, Goreva N V, Isakova T N, Nemyrovska T I, Ueno K, Villa E, Work D M. 2008. Choice of conodont *Idiognathodus simulator (sensu stricto)* as the event marker for the base of the global Gzhelian Stage (Upper Pennsylvanian Series, Carboniferous System). Episodes, 31: 319–325
Henderson C M, Wardlaw B R, Vladimir I D, Schmitz M D, Schiappa T A, Tierney K E, Shen S Z, 2012. Proposal for base-Kungurian GSSP. Permophiles, 56: 8–21
Hounslow M W, Davydov V I, Klootwijk C T, Turner P. 2004. Magnetostratigraphy of the Carboniferous: A review and future prospects. Newsl Carb Stratigr, 22: 35–41
Hu K Y, Qi Y P, Wang Q L, Nemyrovska T I, Chen J T. 2017. Early Pennsylvanian conodonts from the Luokun section of Luodian, Guizhou, South China. Palaeoworld, 26: 64–82
Hu K, Qi Y. 2017. The Moscovian (Pennsylvanian) conodont genus *Swadelina* from Luodian, southern Guizhou, South China. Stratigraphy, 14: 197–215
Ivanov A P. 1926. Middle and Upper Carboniferous deposits of Moscow province (in Russian). Otdel Geol, 5: 133-180
Kaiser S I, Aretz M, Becker R T. 2016. The global Hangenberg Crisis (Devonian-Carboniferous transition): Review of a first-order mass extinction. Geol Soc Spec Publ, 423: 387–437
Korn D, Klug C. 2015. Paleozoic ammonoid biostratigraphy. In: Klug C, Korn D, de Baets K, Kruta I, Mapes R H, eds. Ammonoid Paleobiology: From Macroevolution to Paleogeography. Dordrecht: Springer. 299–328
Kulagina E I, Pazukhin V N, Kotschetkova N M, Sinitsyna Z A, Kochetova N N. 2001. Stratotipicheskiei Opornye Razrezy Bashkirskogo Yarusa Karbona Yuzhnogo Urala. Ufa: Gilem. 138
Kump L R, Arthur M A, 1997. Global chemical erosion during the Cenozoic: Weatherability balances the budgets, In: Ruddiman W F, ed. Tectonic Uplift and Climate Change. New York: Plenum Press. 399–426
Lane H R, Brenckle P L. 2005. Type Mississippian Subdivisions and Biostratigraphic Succession. In: Heckle P H, ed. Stratigraphy and Biostratigraphy of the Mississippian Subsystem (Carboniferous System) in its type region, the Mississippi River Valley of Illinois, Missouri, and Iowa. Champaign: Illinois State Geological Survey. 76–105
Lees A, Miller J. 1985. Facies variations in Waulsortian buildups: Part 2. Mid-Dinantian buildups from Europe and North America. Geol J, 20: 159–180
Li S J. 1987. Late Early Carboniferous to early Late Carboniferous brachiopods from Qixu, Nandan, Guangxi and their palaeoecological significance. In: Wang C Y, ed. Carboniferous Boundaries in China. Beijing: Science Press. 132–150
Liao Z T. 1995. Faunal provinces of Carboniferous brachiopodsin China and their variations across the Carboniferous boundaries. Palaeontol Cathayana, 6: 365–374
McArthur J M, Howarth R J, Shields G A, 2012. Strontium Isotope Stratigraphy, In: Gradstein F, Ogg J, Schmitz M, Ogg G, eds. The Geologic Time Scale 2012. London: Elsevier. 127–144
Mii H, Grossman E L, Yancey T E. 1999. Carboniferous isotope stratigraphies of North America: Implications for Carboniferous paleoceanography and Mississippian glaciation. Geol Soc Am Bull, 111: 960–973
Montañez I P, Poulsen C J. 2013. The Late Paleozoic Ice Age: An evolving paradigm. Annu Rev Earth Planet Sci, 41: 629–656

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

Munier C, Lapparent A. 1893. Note sur la nomenclature des terrains sédimentaires. Bulletin de la Société géologique de France, 3ès, 21: 438–488

Nemyrovska T I. 1999. Bashkirian conodonts of the Donets Basin, Ukraine. Scr Geol, 119: 1–115

Nemyrovska T I. 2011. Preliminary Moscovian conodont scale of the Donets Basin, Ukraine. Newsl Carb Stratigr, 29: 56–61

Nemyrovska T I. 2017. Late Mississippian through Early Pennsylvanian conodont zonation of Ukraine. Stratigraphy, 14: 299–318

Nikitin S N. 1890. The Carboniferous of the Moscow Basin and artesian water in the region of the Moscow Basin. Trans Geol Committee, 5: 139–182

Poletaev V I, Brazhnikova N E, Vasilyuk N P, Vdovenko M V. 1990. Local zones and major Lower Carboniferous biostratigraphic boundaries of the Donets Basin (Donbass), Ukraine, U.S.S.R. Courier Forsch Senekenberg, 130: 47–59

Popp B N, Anderson T F, Sandberg P A. 1986. Brachiopods as indicators of original isotopic compositions in some Paleozoic limestones. Geol Soc Am Bull, 97: 1262–1269

Poty E, Devuyst F X, Hance L. 2006. Upper Devonian and Mississippian foraminiferal and rugose coral zonations of Belgium and northern France: A tool for Eurasian correlations. Geol Mag, 143: 829–857

Qi Y P, Lambert L L, Nemyrovska T I, Wang X D, Hu K Y, Wang Q L. 2016. Late Bashkirian and early Moscovian conodonts from the Naqing section, Luodian, Guizhou, South China. Palaeoworld, 25: 170–187

Qi Y, Nemyrovska T I, Wang X, Chen J, Wang Z, Lane H R, Richards B C, Hu K, Wang Q. 2014. Late Visean-early Serpukhovian conodont succession at the Naqing (Nashui) section in Guizhou, South China. Geol Mag, 151: 254–268

Ramsbottom W H C. 1984. The founding of the Carboniferous System. In: Gordon M Jr, ed. Official Reports. Compte Rendu IX Congrès International du Stratigraphieet Géologie du Carbonifère, Washington & Champaign-Urbana 1979, 1: 109–112

Richards B C. 2013. Current status of the International Carboniferous timescale. In: Lucas S G, ed. The Carboniferous-Permian Transition. New Mexico Mus Nat Hist Sci Bull, 60: 348–353

Riley N J. 1993. Dinantian (Lower Carboniferous) biostratigraphy and chronostratigraphy in the British Isles. J Geol Soc, 150: 427–446

Ross C A, Ross J R P. 1987. Late Paleozoic sea levels and depositional sequences. In: Ross C A, Haman D, eds. Timing and Depositional History of Eustatic Sequences: Constraints on Seismic Stratigraphy. Cushman Found Foraminiferal Res Spec Publ, 24: 137–149

Ross C A, Ross J R P. 1988. Late Paleozoic transgressive-regressive deposition. In: Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G S C, eds. Sea-level Changes: An Integrated Approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication. 227–247

Rossoce S J, Barrick J E. 2013. North American species of the conodont genus *Idiognathodus* from the Moscovian-Kasimovian boundary composite sequence and correlation of the Moscovian-Kasimovian Stage boundary. In: Lucas S G, Dimichele W A, Barrick J E, Schneider J W, Spielmann J A, eds. The Carboniferous-Permian Transition. New Mexico Mus Nat Hist Sci Bull, 60: 354–371

Rygel M C, Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P. 2008. The magnitude of Late Paleozoic glacioeustatic fluctuations: A synthesis. J Sediment Res, 78: 500–511

Saltzman M R, Gonzalez L A, Lohmann K C. 2000. Earliest Carboniferous cooling step triggered by the Antler orogeny? Geology, 28: 347–350

Saltzman M R. 2002. Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the Lower Mississippian (Kinderhookian-lower Osagean), western United States: Implications for seawater chemistry and glaciation. Geol Soc Am Bull, 114: 96–108

Saltzman M R. 2003. The Late Paleozoic Ice Age: Oceanic gateway or pCO_2? Geology, 31: 151–154

Saltzman M, Groessens E, Zhuravlev A. 2004. Carbon cycle models based on extreme changes in $\delta^{13}C$: An example from the lower Mississippian. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 213: 359–377

Sandberg C A, Ziegler W, Leuteritz K, Brill S M. 1978. Phylogeny, speciation, and zonation of *Siphonodella* (Conodonta, Upper Devonian and Lower Carboniferous). Newsl Stratigr, 7: 102–120

Schmidt H. 1925. Die carbonischen Goniatiten Deutschlands. Jahrb Preuss Geol Landesanst, 45: 489–609

Semikhatova S V. 1934. Moscovian deposits of Lower and Middle Volga area and position of the Moscovian Stage in general Carboniferous scale of the USSR. Problems Soviet Geol, 3: 73–92

Sheng Q, Wang X, Brenckle P, Huber B T. 2018. Serpukhovian (Mississippian) foraminiferal zones from the Fenghuangshan section, Anhui Province, South China: Implications for biostratigraphic correlations. Geol J, 53: 45–57

Tarling D H. 1991. Applications of Palaeomagnetism in the Carboniferous. Compte Rendu XI Congress International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifere, Beijing 1987. 205–212

Teodorovich G I. 1949. On the subdivision of Upper Carboniferous into stages. Doklady Akademii Nauk SSSR, 67: 537–540

Ting V K, Grabau A W. 1936. The Carboniferous of China and its bearing on the classification of the Mississippian and Pennsylvanian. Rept 16th Internat Geol Congr 1933. 555–571

Trapp E, Kaufmann B, Mezger K, Korn D, Weyer D. 2004. Numerical calibration of the Devonian-Carboniferous boundary: Two new U-

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311

Pb isotope dilution-thermal ionization mass spectrometry single-zircon ages from Hasselbachtal (Sauerland, Germany). Geology, 32: 857–860

Ueno K, Hayakawa N, Nakazawa T, Wang Y, Wang X. 2013. Pennsylvanian-Early Permian cyclothemic succession on the Yangtze Carbonate Platform, South China. Geol Soc London Spec Publ, 376: 235–267

Ueno K, Task Group. 2014. Report of the task group to establish the Moscovian-Kasimovian and Kasimovian-Gzhelian boundaries. Newsl Carb Stratigr, 31: 36–40

Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebneth S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G, Strauss H. 1999. $^{87}Sr/^{86}Sr$, $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ evolution of Phanerozoic seawater. Chem Geol, 161: 59–88

Villa E, Task Group. 2008. Progress report of the Task Group to establish the Moscovian-Kasimovian and Kasimovian-Gzhelian boundaries. Newsl Carb Stratigr, 26: 12–13

Wagner R H, Winkler Prins C F. 1991. Major subdivisions of the Carboniferous System. Compte Rendu XI Congres International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifere, Beijing 1987. 213–245

Wagner R H, Winkler Prins C F. 2016. History and current status of the Pennsylvanian chronostratigraphic units: Problems of definition and interregional correlation. Newsl Stratigr, 49: 281–320

Walliser O H. 1995. Global events in the Devonian and Carboniferous. In: Walliser O H, ed. Global Events and Event Stratigraphy. Berlin: Springer-Verlag. 225–250

Wang X D, Jin Y G. 2003. Carboniferous Biostratigraphy of China. In: Zhang W T, Chen P J, Palmer A R, eds. Biostratigraphy in China. Beijing: Science Press. 281–330

Wang X, Qi Y, Lambert L, Wang Z, Wang Y, Hu K, Lin W, Chen B. 2011. A potential Global Standard Stratotype-Section and Point of the Moscovian Stage (Carboniferous). Acta Geol Sin, 85: 366–372

Wang X D, Qie W K, Sheng Q Y, Qi Y P, Wang Y, Liao Z T, Shen S Z, Ueno K. 2013. Carboniferous and Lower Permian sedimentological cycles and biotic events of South China. In: Gasiewicz A, Słowakiewicz M, eds. Palaeozoic Climate Cycles: Their Evolutionary and Sedimentological Impact. Geol Soc Spec Publ, 376: 33–46

Wang X D, Wang X J, Zhang F, Zhang H. 2006. Diversity patterns of Carboniferous and Permian rugose corals in South China. Geol J, 41: 329–343

Wang Z H. 1990. Conodont zonation of the Lower Carboniferous in South China and phylogeny of some important species. Courier Forsch Senckenberg, 130: 41–46

Wang Z H, Qi Y P. 2003. Upper Carboniferous (Pennsylvanian) conodonts from South Guizhou of China. Riv Ital Paleontol S, 109: 379–397

Yao L, Qie W, Luo G, Liu J, Algeo T J, Bai X, Yang B, Wang X. 2015. The TICE event: Perturbation of carbon-nitrogen cycles during the mid-Tournaisian (Early Carboniferous) greenhouse-icehouse transition. Chem Geol, 401: 1–14

Yao L, Aretz M, Chen J, Webb G E, Wang X. 2016. Global microbial carbonate proliferation after the end-Devonian mass extinction: Mainly controlled by demise of skeletal bioconstructors. Sci Rep, 6: 39694

Yao L, Wang X D. 2016. Distribution and evolution of Carboniferous reefs in South China. Palaeoworld, 25: 362–376

Yu C C. 1931. The correlation of the Fengning System, the Chinese Lower Carboniferous, as based on coral zones. Geol Soc China Bull, 10: 1–30

Yu C C. 1933. Lower Carboniferous corals of China. Palaeontol Sin Ser B, 12: 1–211

Yu C M. 1988. Devonian-Carboniferous Boundary in Nanbiancun, Guilin, China—Aspects and Records. Beijing: Science Press. 379

Zhang L X. 1987. Carboniferous Stratigraphy in China. Beijing: Science Press. 160

Zhang Z Q. 1988. The Carboniferous System in China. Newsl Stratigr, 18: 51–73

Zong P, Becker R T, Ma X. 2015. Upper Devonian (Famennian) and Lower Carboniferous (Tournaisian) ammonoids from western Junggar, Xinjiang, northwestern China—Stratigraphy, taxonomy and palaeobiogeography. Palaeobio Palaeoenv, 95: 159–202

(责任编委: 沈树忠)

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072017-00311